

**Національний технічний університет України
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені Ігоря Сікорського»**

МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра технології машинобудування

**Магістерська
дисертація на здобуття
ступеня магістра**

Автоматизований вибір параметрів процесу торцевого фрезерування

Автор Мультченко Олексій Володимирович

Н.кер. **Лапковський Сергій Вікторович**

2019

РЕФЕРАТ

Мульченко О. В. Автоматизований вибір параметрів процесу торцевого фрезерування: магістерська дис.: 131. Прикладна механіка. Технології машинобудування/ Мульченко Олексій Володимирович. -Київ, 2019. - 83 с.

Магістерська дисертація містить 83 сторінки, 29 рисунків, 22 таблиці, 23 літературних джерел.

Актуальність теми: до теперішнього часу методологічний аспект вирішення задачі автоматизованого вибору параметрів торцевого фрезерування ще недостатньо відпрацьований.

Метою роботи є розробка технології, та демонстрація основних рекомендацій по виконанню операцій торцевого фрезерування, яка враховує вплив різнорідних чинників на процес торцевого фрезерування деталей, що забезпечують підвищення точності обробки за рахунок управління процесом розвитку коливань.

Для досягнення поставлених цілей були сформульовані і вирішені наступні завдання:

1. Вибрати і обґрунтувати метод підвищення точності торцевого фрезерування.
2. Розробити математичний опис процесу різання, що враховує процеси і зв'язки, які утворюють технологічну систему, а також механізми збудження коливань в ній.
3. Виявити область оптимальних значень зміни швидкості різання і умови, при яких технологічна система може бути поставлена в режим демпфірування коливань.
4. Скласти алгоритм управління процесом різання на основі негативного зворотного зв'язку.

Об'єктом дослідження є процес торцевого фрезерування.

Предметом дослідження є параметри процесу різання при обробленні торцевими фрезами.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Розкрито механізм впливу сил різання на рівень коливань в технологічній системі, при торцевому фрезеруванні зі змінною швидкістю різання, на підставі якого виявлено область раціональних значень зміни швидкості різання, для умов менш жорсткої технологічної системи.

2. Встановлено закономірності, що характеризують вплив прогнозованих факторів обробки: подачі, частоти обертання, швидкості різання, діаметра інструмента - на розвиток коливань в технологічній системі, для процесу торцевого фрезерування в умовах менш жорсткої технологічної системи.

3. Створено методику визначення області раціональних режимів торцевого фрезерування поверхонь деталей із змінною швидкістю різання, в якій враховані умови демпфірування коливань технологічної системи.

Практична значимість одержаних результатів:

1. Розроблено математичний опис процесу торцевого фрезерування, що враховує взаємозв'язок коливань елементів пружної системи і параметрів мікрогеометрії обробленої поверхні, що дозволяє досліджувати як коливальні процеси в будь-який з підсистем технологічної системи, так і процеси формоутворення при різанні.

2. Запропоновано алгоритм системи управління процесом різання на основі негативного зворотного зв'язку, що дозволяє забезпечити необхідну точність торцевого фрезерування.

За темою магістерської дисертації було опубліковано одну наукову публікації, за кордоном.

ТОРЦЕВЕ ФРЕЗЕРУВАННЯ, , ВАРТІСТЬ, МОДЕЛЬ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, АВТОМАТИЗОВАНЕ УПРАВЛІННЯ, ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ.

ABSTRACT

Mulchenko O. Automated choice of parameters of the process of face milling: Master's thesis: 131. Applied mechanics. Mechanical Engineering Technology / Oleksii Mulchenko. - Kiev, 2019. – 83 p.

The master's thesis contains 83 pages, 29 figures, 22 tables, 23 literary sources.

The relevance of the topic: to date, the methodological aspect of solving the problem of automated choice of parameters of face milling is not yet sufficiently worked out.

The purpose of the work is to develop technology and to demonstrate the main recommendations for performing face milling operations, which takes into account the influence of heterogeneous factors on the process of face milling of parts that provide improved machining accuracy by controlling the process of oscillation development.

In order to achieve these goals, the following tasks were formulated and solved:

1. To choose and justify the method of improving the accuracy of end milling.
2. To develop a mathematical description of the cutting process that takes into account the processes and connections that form the technological system, as well as the mechanisms of excitation of vibrations in it.
3. Identify the area of optimal values of change in cutting speed and conditions under which the technological system can be put into the mode of damping of oscillations.
4. To make the algorithm of management of process of cutting on the basis of negative feedback.

The object of the study is the process of face milling.

The subject of the study are the parameters of the cutting process when machining end mills.

Scientific novelty of the obtained results:

1. The mechanism of influence of cutting forces on the level of oscillations in the technological system is revealed, with face milling with variable cutting speed, on the basis of which an area of rational values of change of cutting speed is revealed, for conditions of less rigid technological system.

2. The regularities characterizing the influence of the predicted processing factors have been established: flow, rotation speed, cutting speed, tool diameter - on the development of oscillations in the technological system, for the process of face milling in conditions of less rigid technological system.

3. A technique for determining the area of rational modes of face milling of surfaces of parts with variable cutting speed was created, which took into account the conditions of damping of oscillations of the technological system.

The practical significance of the results obtained:

1. A mathematical description of the process of face milling, which takes into account the relationship of oscillations of the elements of the elastic system and the parameters of the microgeometry of the treated surface, which allows to study both the oscillatory processes in any of the subsystems of the technological system and the processes of forming during cutting.

2. The algorithm of control system of process of cutting on the basis of negative feedback is offered that allows to provide necessary precision of face milling.

On the topic of the master's thesis, one scientific publication was published abroad.

FACE MILLING, COST, MODEL, MATHEMATICAL MODELING,
AUTOMATED CONTROL, ECONOMIC EFFECT.

ЗМІСТ

Вступ.....	9
Перелік умовних позначень.....	10
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНОЛОГІЇ ТОРЦЕВОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ.....	12
1.1 Проблема підвищення ефективності операції торцевого фрезерування.....	12
1.2. Аналіз досліджень динаміки технологічної системи при торцевому фрезеруванні.....	18
1.3. Умови виникнення вібрацій в технологічній системі при фрезеруванні.....	21
1.4. Технологічні особливості виконання операцій торцевого фрезерування.....	25
1.5. Оптимізація процесу торцевого фрезерування за допомогою САМ систем.....	28
1.6. Аналіз методів впливу на процес розвитку коливань при фрезеруванні.....	29
1.5. Висновки до розділу.....	35
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТОРЦЕВОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ.....	37
2.1. Структурна схема динамічної системи верстата.....	37
2.2. Математична модель пружної системи верстата.....	42
2.3. Математична модель інструменту.....	49

2.4. Математична модель заготовки.....	50
2.6. Дослідження коливальних процесів в підсистемі інструменту.....	55
2.7. Висновки до розділу.....	58
РОЗДІЛ 3. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ТОРЦЕВОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ НА ПРАКТИЦІ.....	59
3.1. Розробка алгоритму управління процесом різання.....	59
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ	64
ВИСНОВКИ.....	80
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	82

ВСТУП

В роботі розглядається процес торцевого фрезерування плоских поверхонь деталей. Такі поверхні є основним елементом конструкції деталей в різних металургійних агрегатах і гірських машинах, які є продукцією підприємств важкого машинобудування. У сучасних умовах виробництва пред'являються високі вимоги до якості виконання і працездатності такого роду виробів. Це залежить від якості їх складання, для забезпечення якої, в ряді випадків, механічна обробка деталей відбувається після або в процесі їх складання в конструкції агрегату, в результаті чого зменшуються похибки базування. В цьому випадку пред'являються високі вимоги до геометричної точності оброблених поверхонь, для забезпечення якості збірки.

Для плоских поверхонь основним методом обробки є торцеве фрезерування. При цьому процес фрезерування по силовим і температурним навантаженням часто протікає в край важких умовах через його не стаціонарність. У таких умовах забезпечити геометричну точність оброблених поверхонь дуже складно. Таким чином, було поставлено завдання щодо забезпечення необхідної точності деталей для умов менш жорсткої технологічної системи за допомогою торцевого фрезерування. Що актуально і при модернізації обладнання, але, в цьому випадку, недоліком є велика тривалість операції механічної обробки деталей, що може бути додатковою причиною економічних втрат від простою устаткування.

Розробка спеціальних заходів, а також виконання рекомендацій світових лідерів у сфері металообробки, що сприяють підвищенню точності торцевого фрезерування в умовах менш жорсткої технологічної системи, є актуальним завданням, рішення якого також дозволить підвищити продуктивність обробки.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

W_z	Висота хвилястості обробленої поверхні	[мкм]
A	Амплітуда коливань	[мкм]
$Triz$	Глибина різання	[мкм]
ω	Частота власних коливань	[Гц]
$\varphi_{пл}$	Кут в плані	[°]
P_z	Стале значення сили різання	[Н]
$a_{ср}$	Постійне (середнє) значення товщини шару	[мм]
$K_{пер}$	Коефіцієнт перекриття	
Tr	Постійна часу стружкоутворення	[с]
ξ	Коефіцієнт усадки стружки	
f	Одиниця частоти періодичних процесів	[Гц]
R_a	Шорсткість обробленої поверхні	[мкм]
dy	Похибка виконаного розміру	
A_{opt}	Оптимальна амплітуда коливань	[мкм]
V	Швидкість різання	[мм/хв]
n	Частота обертання шпинделя	[об/хв]
t	Поточний час	[с]
u_i	Зміна товщини зрізу	
Θ_j	положення j -то зуба фрези	[°]
PI8	Швидкорізальна сталь	
T15K6	Титано-вольфрамовий сплав з вмістом 15% титану і 6% кобальту, решта карбід вольфраму.	
BK8	Вольфрамо-кобальтовий сплав з вмістом 8% кобальту	
S_{Mx}	Миттєва подача на j -му зубі фрези	[мм]
C	Константа, що залежить від матеріалу і геометрії різця	
γ	Кутова деформація інструменту	[°]
СК	Система координат	
X_i	Зміщення i -ої маси внаслідок її власних коливань	[м]
X_k	Зміщення контуру	[м]
P_i	Зовнішній силовий вплив на i -у масу	[Н]

Fu_i	Інерційна сила на i -й ланці	[Н]
ε	Задана похибка інтегрування	
F_v, F_r, F_0	Тангенціальна, радіальна і осьова складові сили різання	[Н]
САР	Системи автоматичного регулювання	
Fi	Пружно-деформуюча сила на i -й ланці	[Н]
X'_i і v_i	Вібропереміщення і швидкість i -тої маси	[м], [м/с]
φ_A	Кут між радіусом, проведеним в дану точку A , і віссю x_I системи координат інструмента	[°]
Z_A	Відстань від точки A до площини $O_I x_I y_I$, вимірний вздовж осі z_I	[мм]
φ_2	Кут повороту системи координат інструмента відносно системи координат заготовки	[°]
φ_{IA}	Кутове положення радіуса, проведеного в точку A , в системі координат заготовки	[°]
X_{IA}, Y_{IA}, Z_{IA}	Положення точки A в СК інструменту	
i	Номер твірної	
j	Номер напрямної	
h_x	Крок між вузлами сітки уздовж напрямної	[рад]
h_y	Крок уздовж твірної, тоді кутовий крок між точками буде	[рад]
α_1, α_2	Кути, що визначають параметри силових імпульсів	[рад]
θ_0	Початковий кут	[рад]
Shell-елементи	Мова програмування дуже високого рівня, створює оболонку (Autodesk Inventor)	
α_z	Кут між зубами	[рад]
$\alpha_{вх}$ і $\alpha_{вих}$	Кути входу і виходу зубів з заготовки.	[рад]
V	Збурення	
ε	Сигнал неузгодженості	
U	Сигнал управління	

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНОЛОГІЇ ТОРЦЕВОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ

1.1 Проблема підвищення ефективності операції торцевого фрезерування

Процес фрезерування по силовим та температурним навантаженням часто протікає в дуже важких умовах. Проблема підвищення ефективності операції торцевого фрезерування, більшою мірою, пов'язана з виникаючими в процесі торцевого фрезерування вібраціями та ударними навантаженнями. Появі вібрацій в процесі фрезерування сприяє його нестабільності внаслідок періодичних входів і виходів зубів з контакту із заготовкою, які супроводжуються ударними навантаженнями [1]. Будь-яка інтенсифікація процесу торцевого фрезерування проходить з різким зростанням рівня коливань в технологічній системі [2]. Тому обмеженням для збільшення параметрів різання та підвищення точності обробки при фрезеруванні часто виявляються саме вібрації, особливо для сучасних портативних фрезерних верстатів, що володіють достатньою потужністю.

Особливістю конструкції портативного фрезерного верстата (рис. 1.1) є відсутність станини та столу. Замість них використовується система різного роду напрямних, на одній з яких встановлюється фрезерна головка з приводом. Саме відсутністю жорстко закріпленої стаціонарної станини обумовлена мала жорсткість верстата і технологічної системи в цілому. У такого роду верстатах основним джерелом вібрацій є шпиндельний вузол.

В області високих подач при великих глибинах фрезерування технологічні можливості верстата обмежуються його вібростійкістю. Наявність автоколивань та резонансних вимушених коливань призводить не тільки до зменшення межі стійкості технологічної системи, а й до погіршення параметрів

якості обробленої поверхні. При фінальній обробці, обмеження, що накладаються на значення глибини різання і подачі на зуб, зазвичай пов'язані з вимогами до якості і точності обробленої поверхні. Величина подачі на зуб безпосередньо визначає висоту шорсткості обробленої поверхні і призначається головним чином з геометричних міркувань.

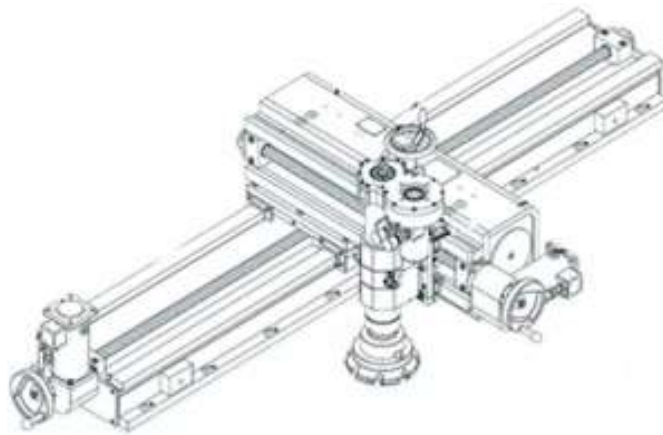


Рис. 1.1. Приклад конструкції портативного фрезерного обладнання

Про вплив вібрацій, що з'являються в процесі обробки, на геометрію оброблених поверхонь вказується в багатьох роботах [1,3]. Наприклад, в роботі [4] доведено, що на величину поверхневих нерівностей, крім геометричних параметрів різальних кромek і режимів різання, впливають фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу і властивості технологічної системи (її вібростійкість). У цій роботі показано, що виникають в процесі різання вібрації впливають головним чином на макрогеометрію поверхні (хвилястість).

В роботі [5] наводяться співвідношення, що відображають кореляційний зв'язок між висотою хвилястості обробленої поверхні W_z (мкм) і амплітудою коливань A (мкм) підсистеми інструменту ($f = 250$ Гц, швидкість різання 100 м/хв):

$$W_z = 7,7 \cdot A^{0,67}, \quad (1.1)$$

а також між висотою хвилястості і амплітудою коливань підсистеми стіл-консоль ($f = 50$ Гц; швидкість різання 120 м / хв):

$$W_z = 0,427 \cdot A^{0,85}, \quad (1.2)$$

(верстат мод. 6Н13, сталь 45, HB 170 ... 174, $D = 200$ мм, $z = 20$, $S_z = 0,1$ мм/зуб).

В роботі [5] вказується, що високочастотні коливання системи інструменту надають більший вплив на параметри хвилястості обробленої поверхні, ніж низькочастотні коливання системи стіл-консоль.

У багатьох роботах відзначається також і про зв'язок коливань з параметрами мікрогеометрії. Так, в роботі [4] на основі експериментального вимірювання амплітуди коливань пристосування і шпинделя вертикально-фрезерного верстата і величини одержуваної шорсткості поверхні показано, що збільшення амплітуди коливань практично пропорційно збільшує висоту мікронерівностей обробленої поверхні.

В роботі [6] вказується, що зниження інтенсивності коливань в процесі кінцевого фрезерування в 10 разів веде до зменшення висоти макро- і мікронерівностей поверхні в 1,8...2 рази, при цьому середнє арифметичне відхилення профілю R_a зростає менш інтенсивно, ніж висота і крок хвилястості, особливо при $tpiz \leq 4$ мм.

В роботі [6] показано, що залежність висоти хвилястості W_z від амплітуди автоколивань A являє собою майже пряму лінію (рис.1.2, а), що проходить через початок координат, що підтверджує пряму пропорційність W_z від A . Шорсткість обробленої поверхні R_a також збільшується з зростанням амплітуд автоколивань (рис. 1.2,б), проте ця залежність простежується менш чітко, так як шорсткість також залежить від режиму різання, геометрії і зносу інструменту

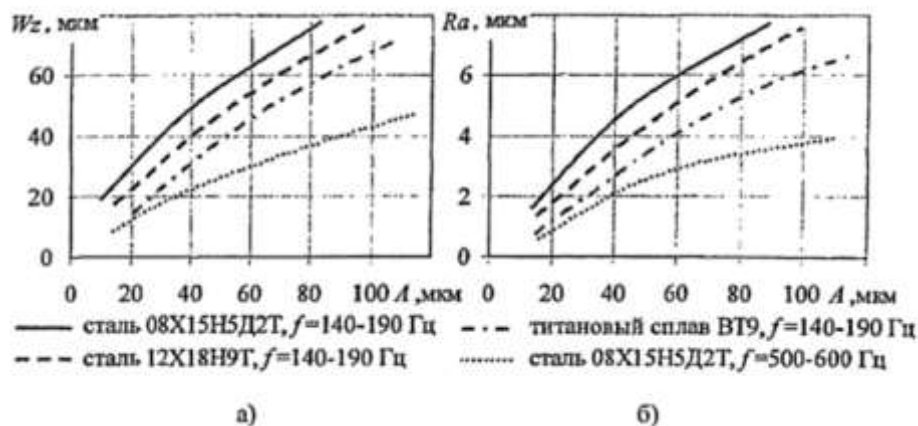
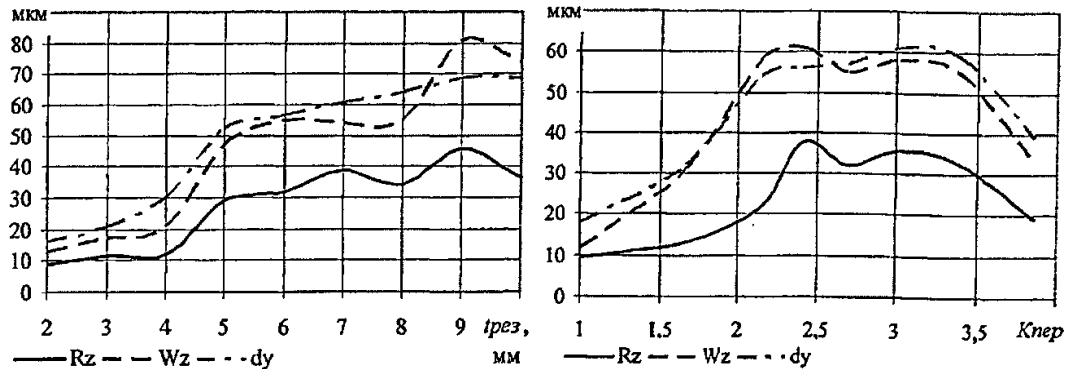


Рис 1.2. Залежність хвилястості (а) і шорсткості (б) обробленої поверхні від амплітуди автоколивань [21]

За даними роботи [6] вплив частоти автоколивань в 5 ... 10 разів слабкіше, ніж вплив амплітуди. При цьому підвищення амплітуди призводить до



збільшення Wz і Ra , а збільшення частоти коливань - до їх зменшення.

Рис. 1.3. Залежність параметрів мікрогеометрії обробленої поверхні Rz , Wz і похибки виконаного обсягу dy від а) глибини різання $t_{рез}$, б) коефіцієнта перекриття $K_{пер}$

Автором роботи [6] було встановлено, що найбільший вплив на розвиток цих коливань надає глибина різання і коефіцієнт перекриття. На рис. 1.3 представлені залежності параметрів мікрогеометрії обробленої поверхні Rz , Wz і похибки виконаного розміру dy (від пружних елементів технологічної системи) від глибини різання і коефіцієнта перекриття, отримані моделюванням процесу фрезерування.

Як видно з графіків 1.3, якість обробленої поверхні різко погіршується, як тільки глибина різання і коефіцієнт перекриття перевищують певну величину, що відповідає моменту виникнення інтенсивних вібрацій на власній частоті системи. Вібрації, що виникають в процесі обробки, впливають також і на стійкість інструменту [1,3,6], і в залежності від частоти і амплітуди вібрацій цей вплив може бути як негативним, так і позитивним.

Автор роботи [8] в результаті проведення стійкісних випробувань при обробці сталей 22ХН11В2,5Г8 і 3ОХГСА виявив, що зношення твердосплавних різців не залежить від інтенсивності низькочастотних вібрацій (рис. 1.4), а для різців з швидкорізальної сталі інтенсивність зносу в міру зменшення частоти коливань заготовки збільшується.

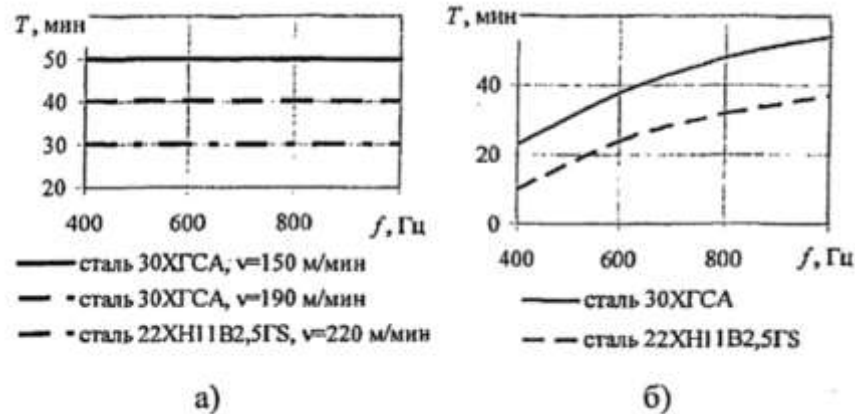


Рис. 1.4. Залежність стійкості різців від частоти вібрацій:

а) - різців з твердого сплаву Т15К6; б) - різців з швидкорізальної сталі Р18. [7]

В роботі [8] встановлено, що при попутному фрезеруванні однозубою торцевої фрезою, оснащеної твердим сплавом ВК8, стійкість різко знижується при розмаху коливань заготовки, що перевищують критичну величину 0,07-0,1 мм. Більш того, при попутному фрезеруванні на стійкість твердосплавних фрез впливає напрямок низької жорсткості підсистеми заготовки. Найбільше зниження стійкості спостерігається при низькій жорсткості в напрямку ширини фрезерування.

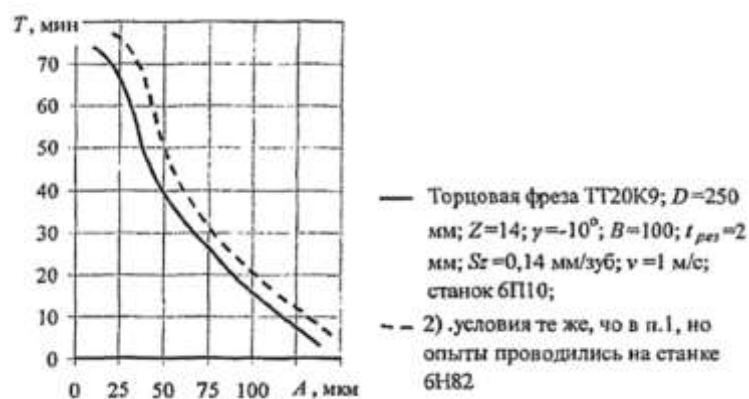


Рис. 1.5. Залежність стійкості інструменту від амплітуди коливань при торцевому фрезеруванні сталі [7]

Результати дослідження за визначенням залежності стійкості інструменту від амплітуди коливань при різанні важкооброблюваних матеріалів в роботі [7] показали, що амплітуда коливань істотно впливає на стійкість інструменту.

На рис 1.5 показані криві залежності стійкості інструменту від амплітуди при торцевому фрезеруванні. Ці криві описуються рівнянням [7]:

$$T = Q \cdot A^m \cdot e^{-nA}, \quad (1.3)$$

де Q , m і n - постійні, залежні від роду оброблюваного та інструментального матеріалів і умов різання.

Аналіз графіків на рис. 1.5 показує, що залежність стійкості від амплітуди коливань носить екстремальний характер. Для кожного технологічного процесу є зона амплітуд автоколивань, при яких стійкість інструменту має максимальне значення, у міру виходу з цієї зони стійкість інструменту різко знижується.

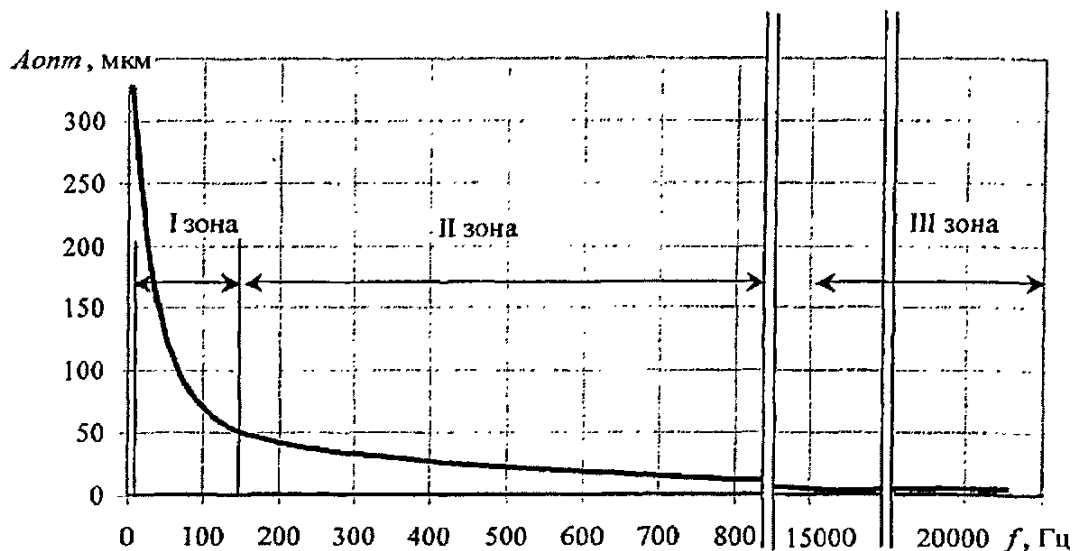


Рис. 1.6. Залежність оптимального по стійкості інструмента значення амплітуди коливань від їх частоти [21]

Автор [7] ділить весь частотний діапазон на три зони (рис. 1.6). У першій зоні коливань ($f=20\ldots150$ Гц, $A_{opt}=30\ldots150$ мкм) поліпшення оброблення забезпечується за рахунок дроблення стружки і полегшення її відведення, за рахунок поліпшення підведення ЗМОТС до ріжучого леза. Друга зона коливань ($f=150\ldots1000$ Гц, $A_{opt} = 8\ldots20$ мкм) охоплює область автоколивань. Поліпшення оброблення в цій зоні досягається за рахунок полегшення

пластичної деформації, зниження сил різання і тертя. Третя зона ($f=15...35$ кГц, $A_{опт}=1...5$ мкм) включає в себе ультразвукові вимушені коливання. Такі коливання покращують оброблення внаслідок впливу на недосконалість кристалічної будови оброблюваного металу. Таким чином, забезпеченням оптимального рівня коливань (тобто їх амплітуди) можна не тільки не зменшити, а й збільшити стійкість інструмента.

Таким чином, проблема підвищення ефективності торцевого фрезерування полягає в зменшенні резонансних вимушених коливань і автоколивань, що виникають в процесі різання внаслідок регенеративного ефекту. Це дозволить збільшити продуктивність обробки, підвищити точність і поліпшити якість оброблених поверхонь. Для розробки ефективних методів впливу на рівень вібрацій необхідний аналіз технологічної системи в динаміці.

1.2. Аналіз досліджень динаміки технологічної системи при торцевому фрезеруванні

Сучасні дослідження динаміки технологічної системи базуються на основних положеннях, розроблених В.А. Кудіновим, яким розглянуті основні питання динаміки верстатів: еквівалентні і пружні системи, робочі процеси, стійкість динамічної системи, стаціонарні і перехідні процеси, вимушені коливання при різанні і переміщенні вузлів.

Відзначено, що коливання в технологічних системах вивчали досі в основному стосовно токарної, розточної і свердлильної обробки. За фрезерної обробки досліджені в основному динаміка несучих систем стаціонарних консольних верстатів вертикальної і горизонтальної компоновок, динаміка кінцевих фрез, в плані підвищення їх стійкості, технології багатокординатної фрезерної обробки. Дослідженню коливань портативних фрезерних верстатів і коливань технологічної системи в цілому, як в нашій країні, так і за кордоном присвячено небагато робіт.

Роботи, присвячені дослідженню динамічних характеристик фрезерних верстатів, показують, що ці верстати схильні до інтенсивних вібрацій. Записи коливань елементів несучої системи верстатів, отримані при торцевому фрезеруванні, свідчать про складний характер процесу коливань, тому, щоб оцінити характер, частотний склад і рівень коливань, необхідно використовувати спеціальні методи дослідження та аналізу сигналів, зокрема спектрально-кореляційні методи теорії стаціонарних випадкових процесів.

Вивченню вібрацій у фрезерних верстатах присвячено багато робіт дослідників [9, 10]. Аналіз цих робіт показує, що при торцевому фрезеруванні залежно від конфігурації фрезерного верстата і використовуваних режимів різання, основна частка відносних коливань інструменту і заготовки може припадати на різні вузли верстата. Так, в роботі [10] проведені дослідження фрезерно-розточувального верстата мод.6М610Ф2-1 показали, що в його технологічній системі основна частка пружних переміщень (до 80%) припадає на привід столу і фрезерну каретку в напрямку подачі столу. При цьому найбільша амплітуда коливань спостерігається у столі і, в залежності від режимів різання, у повзуна або каретки. Основну частку відносних коливань інструменту і заготовки становлять поздовжні коливання столу і повзуна. А в роботі [11] встановлено, що при фрезеруванні найбільш слабкою ланкою системи з точки зору динамічної жорсткості є шпиндель з оправкой і інструментом. В горизонтальній площині найбільш інтенсивні коливання здійснює шпиндельна бабка, а у вертикальній - звисаючі кінці столу, салазок і консолі.

Серед всіх параметрів режимів різання найбільш сильний вплив на інтенсивність коливань надають глибина і ширина фрезерування [8, 9]. Зі збільшенням ширини зростає кут контакту фрези з оброблюваною деталлю, і в зв'язку з цим одночасно в роботу вступає більша кількість зубів, збільшується загальна ширина зрізаного шару металу. Зі збільшенням глибини різання майже прямо пропорційно збільшується інтенсивність вібрацій. Зі збільшенням ширини фрезерування вібрації наростають менш інтенсивно [9]. Збільшення

ширини заготовки при симетричному фрезеруванні призводить до зниження величини ударних навантажень при вході і виході зуба фрези з заготовки. При цьому при попутному фрезеруванні границі стійкості верстата вище.

Вплив подачі і швидкості різання на рівень вібрацій при фрезеруванні неоднозначний. Так, в роботах [10, 11] відзначається, що збільшення подачі призводить до зниження інтенсивності вібрацій, а в роботах [2, 12] - до їх збільшення; в роботах [9, 6] вказується на те, що при збільшенні подачі до деякого значення амплітуда вібрацій зростає, а потім зменшується.

Збільшення швидкості різання може також призводити як до збільшення, так і зменшення рівня вібрацій елементів технологічної системи. Ця залежність може носити немонотонний характер, то зростаючи, то зменшуючись.

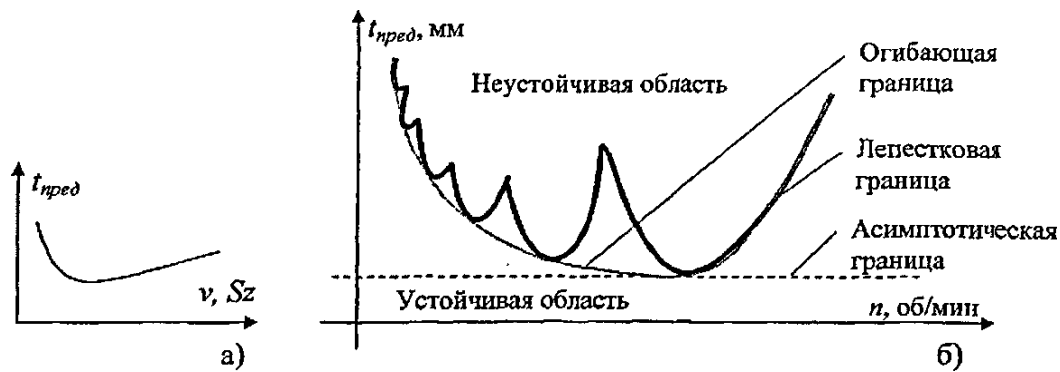


Рис. 1.7. Залежність граничної глибини різання $t_{гран}$ від:

а) швидкості різання V і подачі на зуб; б) частоти обертання шпинделя [13]

В роботі [13] для однолезової обробки отримана залежність між граничною глибиною різання, вище якої рівень вібрацій стає неприпустимо великим, швидкістю різання і подачею (рис. 1.7, а), яка має мінімум при значеннях

$$v_{t=\min} = \omega \cdot S_z \cdot \sin \varphi_{пл}, \quad S_{z t=\min} = \frac{v}{\omega \cdot \sin \varphi_{пл}}, \quad (1.4)$$

де ω - частота власних коливань системи, рад/с; $\varphi_{пл}$ - кут в плані, градуси.

У дослідженнях зарубіжних авторів широко використовується інший вид цієї залежності, званий пелюстковою границею стійкості (рис. 1.7). Її головна відмінність полягає в тому, що вона охоплює область високих швидкостей

різання (при торцевому фрезеруванні вона обмежена значенням частоти обертання шпинделя до $n=3000$ об/хв). Пелюсткова границя стійкості наочно показує, яким чином рівень коливань в технологічній системі залежить від частоти обертання (або швидкості різання) в досить широкому діапазоні її зміни.

В цілому, у всіх вище зазначених роботах відзначається, що при фрезеруванні швидкість різання в меншій мірі впливає на інтенсивність вібрацій, ніж глибина і ширина фрезерування. Збільшення швидкості різання може також призводити як до збільшення, так і зменшення рівня вібрацій елементів технологічної системи. У більшості робіт відзначається, що технологічну систему при торцевому фрезеруванні слід розглядати як нелінійну динамічну систему із запізненням. На рівень вібрацій може також впливати число зубів. Збільшення числа зубів фрез, як правило, призводить до збільшення амплітуд вібрацій, так як збільшується енергія збудження.

Аналіз робіт в області динаміки фрезерування показав, що, по-перше, в залежності від умов обробки «завібрувати» може будь-який вузол верстата, включаючи головний привід; по-друге, зі збільшенням режимів різання рівень вібрацій елементів технологічної системи в загальному випадку зростає, і по-третє, це зростання може носити немонотонний характер і залежить від конкретних умов обробки (режимів різання, параметрів і конфігурації верстата, матеріалу ріжучої частини інструменту і оброблюваного матеріалу, і т.д.). Отже, для визначення залежності рівня вібрацій від режимів різання необхідно знати їх природу і умови виникнення

1.3. Умови виникнення вібрацій в технологічній системі при фрезеруванні

Вібрації, що виникають при роботі на фрезерних верстатах, в залежності від причин, які їх викликають, поділяють на два класи. До першого відносять вимушені коливання, які викликаються і підтримуються енергетичним

джерелом періодичного характеру. Такими джерелами можуть бути як зовнішні силові і кінематичні впливи, так і зміни налаштування системи внаслідок дії будь-яких її внутрішніх факторів. Потужним джерелом вимушених коливань при торцевому фрезеруванні є ударні навантаження, що виникають від врізання зуба фрези в заготовку.

Частота вимушених коливань дорівнює частоті змушуючої сили, а їх амплітуда залежить від жорсткості технологічної системи. В роботі [11] зазначено, що складний характер збурень і їх щільний спектр в силу резонансних властивостей («вибірковості») пружної системи призводить до виділення крім коливань на основній частоті збурення, також коливань на власних частотах системи. При резонансі однієї з гармонік збурення з будь-якої власної частотою одного з елементів технологічної системи відбувається різке зростання амплітуд на цій частоті і загального рівня вібрацій.

Вібрації в технологічній системі можуть виникнути і при відсутності змушуючої періодичної сили. Ці вібрації можуть бути незатухаючими і називаються автоколиваннями. При автоколиваннях джерело енергії, яка заповнює її втрату на роботу дисипативних сил, за своєю природою не є періодичним. Мінлива сила створюється самою замкнутою динамічною системою за рахунок її внутрішніх зв'язків. Аналіз літературних даних показав, що основними причинами виникнення автоколивань при торцевому фрезеруванні є регенеративне збудження від хвилеподібного сліду [3, 1, 2] і координатний зв'язок. У багатьох роботах також в якості джерел автоколивань вказуються: не лінійно падаюча залежність «сила-швидкість» [9, 13]; відставання зміни сил різання від зміни товщини зрізаного шару [2, 11]; зміна робочих кутів ріжучого інструменту в процесі вібрацій [4]. Однак, згідно з проведеними дослідженнями [2, 6], залежність сили різання що падає, від швидкості для більшості процесів лезової обробки металів не може вважатися істотною причиною автоколивань, оскільки вона встановлена при стаціонарних режимах обробки і впливає безпосередньо не так на силу різання, як на температуру, усадку стружки і інші контактні явища в зоні різання. В

результаті цього при малих відносних зсувах інструменту і заготовки при коливаннях сили різання змінюються значно менше, ніж при стаціонарному різанні.

Проведені в роботі [6] експерименти показали, що під час вібрацій відбувається одночасна зміна переднього і заднього кутів інструменту, яке в сумі мало впливає на величину складових сили різання. У цій же роботі було встановлено, що зриви наростів не можуть підтримувати автоколивання, а можуть бути лише причиною первинного поштовху, який виводить систему з рівноваги.

Цікавий підхід до питання про запізнення сил різання по відношенню до товщини зрізаного шару при переривчастій обробці запропонований в роботі [9], в якій розглянуті закономірності протікання перехідного процесу при точінні східчастих кілець зі сталі 45.

У результаті проведених експериментів автор [9] встановив, що характер протікання перехідного процесу залежить від величини діючих в початковий момент врізання сил. Якщо ці сили дорівнюють нулю, спостерігається аперіодичний перехідний процес, який приблизно може бути описаний рівнянням експоненти:

$$P_z(t) = P_z \cdot \left(1 - e^{-t/T_p}\right), \quad (1.5)$$

де P_z - стале значення сили різання, Н;

t - поточний час, с; $T_p = C \cdot \frac{a_{cp} \cdot \xi}{v}$ - постійна часу стружкоутворення (час, протягом якого сила різання досягає 0,63 сталого значення P_z), с; C - константа, що залежить від матеріалу і геометрії різця, $C=1...1,5$; a_{cp} - постійне (середнє) значення товщини шару, що зрізається, мм; ξ - коефіцієнт усадки стружки (для сталі = 2,5...3).

Це рівняння аналогічно рівнянням, отриманим в роботі [11] та інших для опису відставання сил різання від зміни товщини зрізаного шару внаслідок так званої «інерційності» процесу пластичного деформування. Автор роботи [9]

пояснює наявність перехідного процесу тільки динамічними властивостями самої технологічної системи.

Вторинне порушення автоколивань настає при роботі по хвильо-подібному сліду, залишеному на поверхні різання при проході попереднього зуба інструмента. При цьому на систему діє збуджуючий вплив, яким є гармонійно змінюваний припуск, автор роботи [6] вперше експериментально показав, що в умовах вільного точіння автоколивальний процес підтримується в основному за рахунок сліду, залишеного на попередньому обороті деталі.

Досить потужним джерелом автоколивань при наявності в системі двох і більше ступенів свободи може бути так званий «координатний зв'язок». В роботі [11] вказується, що координатний зв'язок виникає, наприклад, в тому випадку, якщо діюча на систему сила не проходить через її центр жорсткості, і до зміщення вздовж осей жорсткості додається зсув від повороту навколо даного центру. Стосовно до торцевого фрезерування така ситуація виникає при додатку тангенціальної сили до будь-якого з зубів фрези. У деяких роботах відзначається значний вплив головного приводу на стійкість процесу фрезерування. В роботі [6] вказується, що при торцевому фрезеруванні порушення стійкості зазвичай відбувається на згино- крутильній формі коливаль пружної системи верстата. Крутильні і тангенціальні коливання не залишають слідів на обробленій поверхні, однак вони впливають на поперечні коливання, так як вони змінюють миттєве значення швидкості різання. В роботі [14] при прийнятому допущенні, що при повороті фрези товщина шару, що зрізається змінюється за синусоїдальним законом, було виведено співвідношення для додаткової зміни товщини зрізу u_i на j -м зубі в залежності від кутової деформації шпинделя з інструментом.

$$u_i(\gamma) = -2 \cdot S_{Mx} \cdot \cos \Theta_j \cdot \sin(\gamma/2) \cdot \sin \varphi_{ni}, \quad (1.6)$$

де Θ_j - положення j -то зуба фрези, градуси; S_{Mx} - миттєва подача на j -му зубі фрези, мм/зуб; γ - кутова деформація інструменту, градуси.

Аналіз цієї формули показує, що в залежності від кутового положення зуба знак збільшення, а, отже, і координатний зворотний зв'язок, може бути як

негативним, так і позитивним. При зустрічному фрезеруванні зворотний зв'язок негативний, при попутному - позитивний. Для симетричного фрезерування коефіцієнт зворотного зв'язку мінімальний.

Таким чином, зменшити рівень вібрацій, та підвищити точність обробки при торцевому фрезеруванні можна або впливом на вимушені коливання, або на автоколивання в залежності від того, які з них переважають. Для ефективного впливу на процес розвитку коливань в системі, необхідно створити певні умови обробки, що дозволить, як забезпечити необхідну точність, так і підвищити якість оброблених поверхонь. Але передусім, при можливості, потрібно дотримуватись практичних рекомендацій світових лідерів у сфері металорізання.

1.4. Технологічні особливості виконання операцій торцевого фрезерування

Компанія Sandvik Coromant за час проектування та виготовлення високоякісного та передового інструменту накопичила великий досвід у металообробці, та виконанні операцій торцевого фрезерування, в тому числі.

До основних практичних порад та рекомендацій можна віднести наступні:

- Необхідно обирати діаметр фрези D_ϕ , більшим за ширину різання B на 20-50% (рис. 1.8). [15]

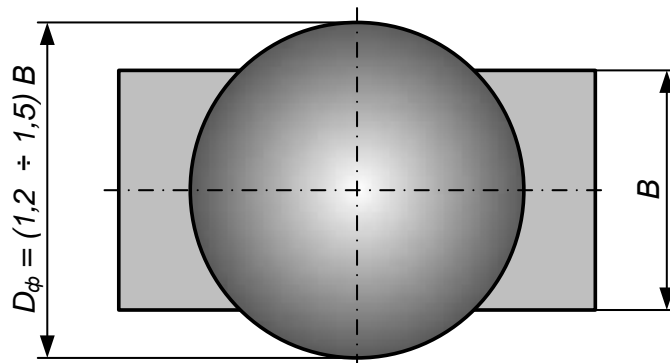


Рис. 1.8. Співвідношення діаметра фрези та ширини різання

- При торцевому фрезеруванні кромek тонкостінних деталей торцевими фрезами, інструмент необхідно розташовувати зі зміщенням від центру поверхні. За таких умов процес різання стає більш стабільним, а сили різання розподіляються рівномірно, що мінімізує ризик виникнення вібрацій (рис. 1.9). [15]

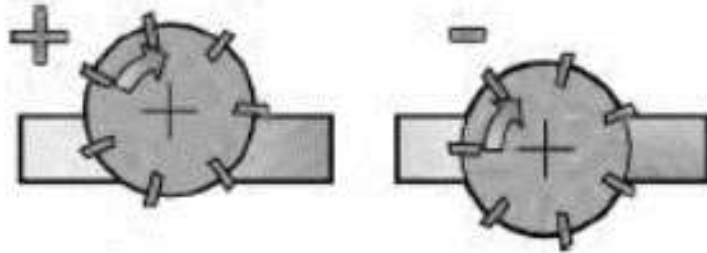


Рис. 1.9. Зміщення вісі інструменту відносно центру оброблюваної поверхні

- Застосування технології попутного фрезерування створює більш сприятливі умови для стружкоутворення: на вході інструмента формується більш товста стружка, а на виході - більш тонка (рис. 1.10). [15]

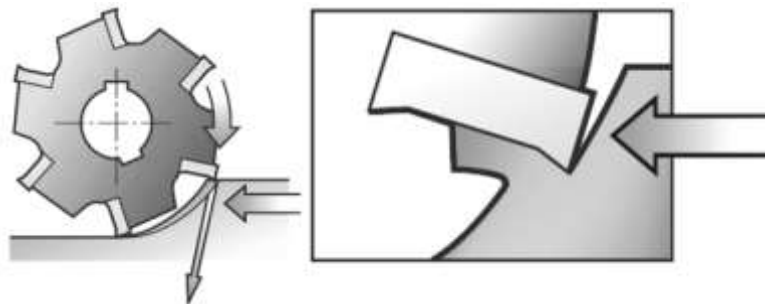


Рис. 1.10. Схема попутного фрезерування

- Для зменшення ударних навантажень на інструмент і плавного врізання в заготовку необхідно формувати траєкторію інструмента по дузі, одночасно зменшуючи подачу (рис. 1.11). [15]

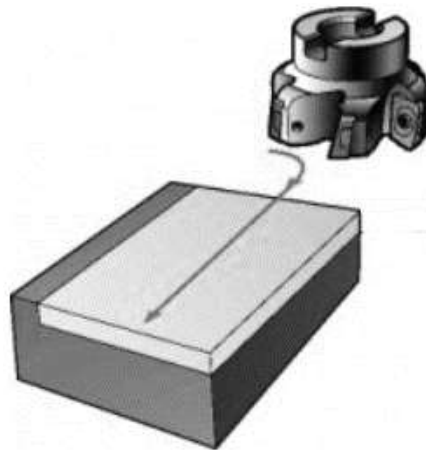


Рис. 1.11. Траекторія врізання інструмента в заготовку по дузі

- Для запобігання не сприятливих напружень на ріжучій кромці інструменту і утворенню вібрацій, потрібно програмувати траекторію інструменту так, щоб інструмент був завжди в контакті з заготовкою, а не проводити декілька паралельних проходів (рис. 1.12). [15]

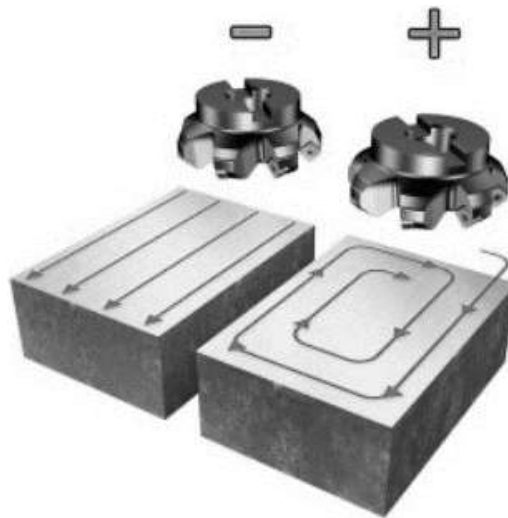


Рис. 1.12. Безперервне оброблення площини

- За можливістю, слід уникати переривчасту обробку (поверхні з отворами та пазами). Такий вид обробки вимагає більшої міцності ріжучої частини інструменту та приводить до багаторазових врізань та виходів із різання. Якщо уникнути такої обробки не можливо, слід зменшити подачу вдвічі (рис. 1.13). [15]

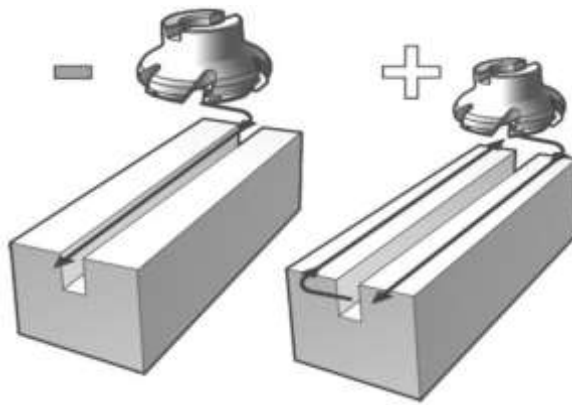


Рис. 1.13. Уникнення переривчастого торцевого фрезерування

- При фрезеруванні тонкостінних та нестійких в осьовому напрямку заготовок потрібно обирати інструмент з головним кутом в плані 90° , за таких умов основна частина сил різання буде в радіальному напрямку (рис. 1.14).[15]

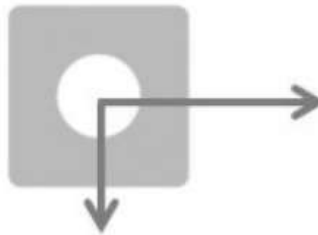


Рис. 1.14. Схема напрямку дії ріжучих сил при використанні фрез з головним кутом в плані 90° [15]

1.5. Оптимізація процесу торцевого фрезерування за допомогою CAM систем.

Істотне ускладнення задач обробки на верстатах з ЧПК, а також тотальна автоматизація проектування технологічних процесів привела до появи спеціальних комп'ютерних систем CAM (Computer Aided Manufacturing). Головною задачею таких систем є автоматичне проектування траєкторій формоутворюючих рухів інструмента. При чому автоматично спроектована управляюча програма в основному містить код G01, що відповідає лінійній інтерполяції траєкторій. Призначення режимів різання дається повністю на

вибір технолога, а можливість зміни режимів різання під час проведення обробки-відсутня. Наразі переважна частина управляючих програм для металорізальних верстатів проектується в САМ системах. Торцеве фрезерування не є винятком. Одним із яскравих прикладів таких систем є інтегрована система проектування нового покоління SolidCam та її фірмова технологія IMachining.

Цей програмний модуль за заданими параметрами, а саме: матеріалом заготовки, матеріалом різальної кромки інструмента, геометричними параметрами інструмента, параметрами верстата з ЧПК, автоматично розраховує оптимальні режими різання та траєкторії руху фрези.



Рис. 1.15. Схема вхідних та вихідних даних IMachining

Динамічно, під час оброблення, підбирає швидкість подачі, в цілях компенсації динамічних змін кута різання, які неминучі, при русі по генерованим модулем IMachining спеціальним односпрямованим траєкторіям руху інструмента. Окрему увагу необхідно приділити траєкторіям рухів фрези, із застосуванням модуля IMachining, формоутворюючі рухи приймають форму спіралі, що відповідає рекомендаціям світових лідерів у сфері металообробки. Такі параметри оптимізовані під конкретний верстат, що дозволяє на етапі проектування технологічного процесу підвищити продуктивність, точність, якість поверхні, підвищити термін служби інструменту та зменшити ризик виникнення вібрацій. При використанні САМ системи з модулем IMachining, значно поліпшуються умови обробки, та її продуктивність, але поява вібрацій все одно може бути присутня, за рахунок природи процесу торцевого

фрезерування, а саме постійних ударних навантажень. Таким чином, для того, щоб зменшити рівень вібрацій, при торцевому фрезеруванні можна або вплинути на вимушені коливання, або на автоколивання в залежності від того, які з них переважають

1.6. Аналіз методів впливу на процес розвитку коливань при фрезеруванні

Аналіз досліджень динаміки системи і умов виникнення вібрацій при фрезеруванні показав, що для підвищення точності обробки найбільш актуальним завданням є подавлення коливань, що виникають при різанні.

Поставлену задачу можна вирішити, усуваючи або зменшуючи джерела збудження автоколивань, найбільш потужним з яких є регенеративне збудження від сліду на поверхні різання. При цьому впливом на механізм регенеративного порушення можна зменшити не тільки автоколивання, а й змушені коливання.

Дослідженню природи регенеративних коливань присвячено багато робіт [11,13]. Фундаментальна теорія регенеративних коливань була розроблена в роботі [13]. Merritt H. E. [16] розробив теорію аналізу стійкості регенеративних автоколивань, засновану на критерії стійкості.

В даний час розробляються такі методи впливу на механізм регенеративного порушення коливань:

1. інструменти зі змінними по його периметру конструктивно-геометричними параметрами зубів;
2. використання оптимальної частоти обертання шпинделя;
3. використання спеціальних пристроїв - демпферів;
4. обробка зі змінною швидкістю різання.

Серед інструментів зі змінними конструктивно-геометричними параметрами найбільшого поширення набули фрези з нерівномірним розташуванням зубів. Дослідженню фрез з нерівномірним розташуванням зубів

присвячено багато робіт [11, 13]. Більшій ефективності цього методу заважає та обставина, що частота автоколивань внаслідок змінності коефіцієнта різання не залишається постійною в процесі різання, а це вимагає відповідних змін налаштування кутового положення зубів. Іншим недоліком цього методу є те, що фрези з різною нерівномірністю кроку працюють ефективно, кожна при своїй швидкості різання. Розташування зубів, що забезпечує зниження вібрацій, залежить від умов різання, а також геометрії інструменту та заготовки; якщо умови різання непостійні, то для забезпечення бажаного ефекту може знадобитися міняти розташування зубів. Тому необхідно або створити фрези з регульованим розташуванням зубів, або готувати кілька фрез з різним кутовим розташуванням зубів, призначених для різних умов різання. Вирішення першого завдання пов'язане з труднощами конструктивного виконання такого інструменту, другий - з великими економічними витратами. Тому торцеві фрези з нерівномірним кроком не знайшли широкого застосування в промисловості.

Другий метод впливу на регенеративний механізм за рахунок вибору частоти обертання шпинделя досить перспективний [13]. В даний час він бурхливо розвивається. Використання високих частот обертання також проблематично, оскільки для здійснення високошвидкісного різання вимагаються верстати з підвищеною жорсткістю і потужністю електродвигуна головного руху, оснащені спеціальними шпиндельними вузлами і пристроями ЧПУ. Таке обладнання досить дороге, та висуває особливі вимоги до його обслуговування.

Зараз активно розвивається напрямок по зменшенню вібрацій, що виникають при різанні металів, за допомогою спеціальних пристроїв - демпферів (віброгасників). Дія віброгасників заснована на підвищенні опору різких коливань сил, що діють в системі верстат - пристосування - інструмент - деталь. Існує багато різноманітних конструкцій демпферів. Найбільш часто зустрічаються два види конструкцій: ударної дії і динамічний. Демпфер ударного дії досить простий по конструкції. Його основним елементом є досить велика маса, поміщена з зазорами в корпусі інструменту. При ударах маси про

вібруючу частину системи енергія коливань розсіюється і тому інтенсивність вібрацій зменшується. Такий демпфер призначений головним чином для токарних і розточувальних верстатів. Для фрезерних верстатів використовуються динамічні демпфери. Динамічний демпфер виконується у вигляді невеликої маси, пружно зміцнюється на нестійке ланка. Ця маса має частоту власних коливань, що дорівнює частоті коливань системи. Робота динамічного демпфера заснована на тому, що маса коливається в протифазі, тобто фаза її відрізняється від фази коливань вібруючого ланки. В результаті цього виникає сила, рівна, але протилежно спрямована силі, збудливою коливання. На фрезерних стаціонарних верстатах демпфери можуть застосовуватися як окремі пристрої (віброгасники), що встановлюються на шпиндельний вузол або стіл верстата (рис. 1.8), і як елементи конструкції інструменту або фрезерної оправки. При цьому підвищується жорсткість заготовки або інструменту, як одного з елементів технологічної системи, сам верстат повинен мати достатню твердість для здійснення обробки з необхідними параметрами. При застосуванні портативного обладнання, мала жорсткість системи обумовлена малою жорсткістю верстата, підвищити яку без втручання в його конструкцію досить складно.

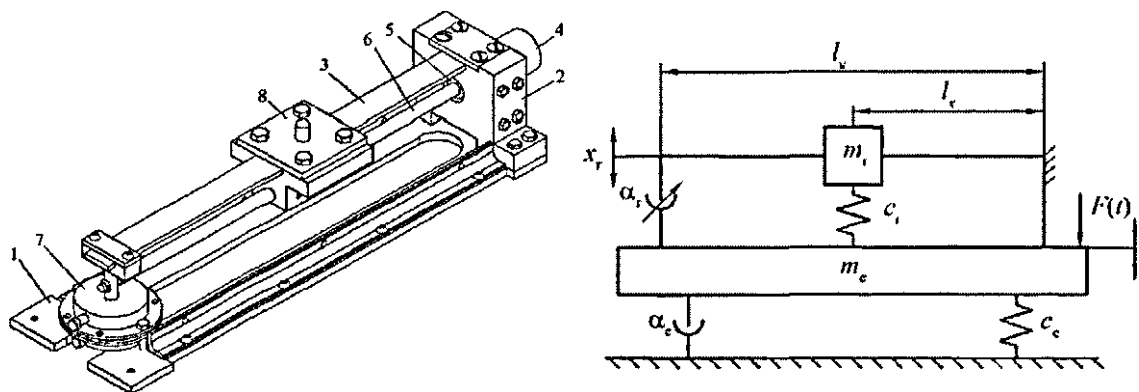


Рис. 1.16. Динамічний віброгасник коливань: 1) основа; 2) корпус; 3) пружний елемент; 4) кроковий двигун; 5) кульова опора; 6) ходовий гвинт; 7) пневматичний демпфер; 8) рухома маса з вбудованою гайкою кочення

Конструкції демпферів різноманітні, але всі вони характеризуються складною конструкцією і відсутністю системи швидкого переналагодження під

змінний рівень вібрації технологічної системи, що особливо важливо при обробці поверхонь великої площі. Таким чином, демпферуючі пристрої на портативних фрезерних верстатах використовувати досить складно через конструктивні особливості обладнання.

При торцевому фрезеруванні найбільш прийнятним способом впливу на регенеративне збудження коливань є змінна швидкість різання. Використання змінної швидкості для демпфірування коливань - порівняно нова концепція, і перші публікації на цю тему з'явилися в 70-х роках [17]. Дві головні проблеми на шляху ефективного використання цього методу - вибір оптимального закону зміни швидкості і способу його реалізації на виробництві. Перша проблема пов'язана зі складністю математичного опису самого механізму регенеративного порушення коливань, друга проблема конструктивного характеру. Однак, сучасні типи електроприводів, системи ЧПУ і системи вібромоніторинга дають можливість застосування такої технології, в тому числі на портативному обладнанні.

При виборі оптимального закону зміни швидкості необхідно знайти умови, при яких система може бути поставлена в режим демпфірування коливань. Цей вибір повинен, в першу чергу, базуватися на залежностях, що відображають вплив різних чинників, в тому числі швидкості різання, на процес розвитку регенеративних коливань. В силу досить складної природи регенеративних коливань отримання таких залежностей у вигляді емпіричних моделей досить складно, тому для досягнення поставленої мети, як правило, будується математична модель процесу різання на основі даних про структуру динамічної системи досліджуваного верстата, а також механізми збудження коливань в ній. Адекватність і точність використовуваних математичних моделей багато в чому визначають достовірність отриманих результатів.

Аналіз графіка 1.17 показує, що при використанні змінної швидкості різання при одних значеннях швидкості різання спостерігається зменшення рівня вібрацій, при інших - збільшення в порівнянні з різанням з постійною швидкістю. З цього можна зробити висновок про неоднозначний вплив змінної

швидкості на рівень коливань. Тому обробку зі змінною швидкістю різання слід здійснювати насамперед за рахунок зміни регульованих параметрів обробки, як частоти обертання, так і хвилинної подачі.

Також, аналіз графіка 1.17 показує, що параметри синусоїдального зміни швидкості різання необхідно вибирати в залежності від динамічних властивостей системи, а також умов різання. Тому, для реалізації технології зі змінною швидкістю різання, актуальним завданням є установка характеру впливу режимів різання на процес розвитку коливань в системі.

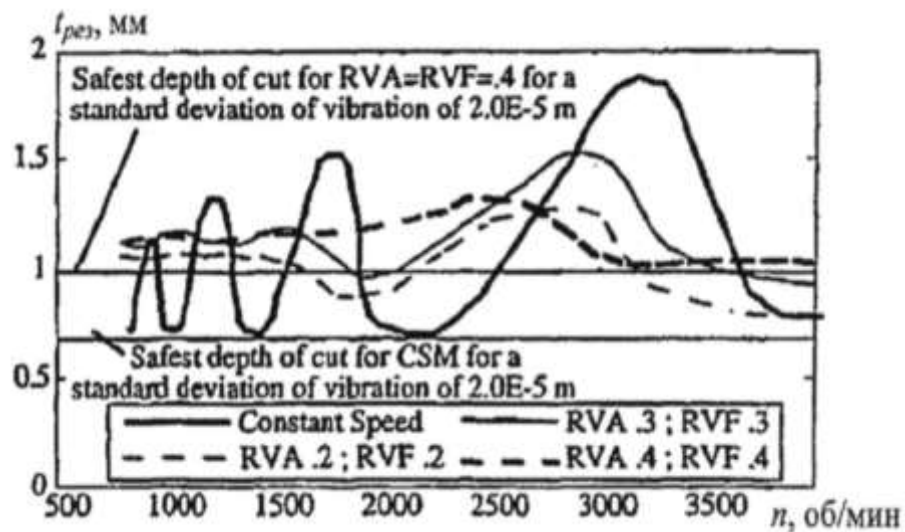


Рис. 1.17. Границя стійкості торцевого фрезерування при використанні змінної швидкості різання: результати моделювання для системи з одним ступенем свободи [17]

В процесі торцевого фрезерування коливальний процес може протікати в одному з видів: власні вимушені коливання, вимушені резонансні коливання і автоколивання у формі биття. Періодична змінність швидкості різання при переривчастій обробці перешкоджає розвитку автоколивань, як і при безперервній обробці, проте їх місце займають резонансні вимушені коливання; в обох випадках коливання протікають на власній частоті системи з досить високим рівнем, і обробка, як правило, є неприпустимою за вимогами міцності ріжучої частини інструменту і вузлів верстата.

Наявність змінної швидкості при переривчастої обробці призводить не до зменшення рівня регенеративних коливань, а до зміни автоколивань на

резонансні вимушені коливання. В роботі [12] зазначено, що коливання при різанні, що мають частоту власних коливань системи і є вимушеними, буває важко відрізнити від автоколивань. Тому, коли говорять про боротьбу з автоколиваннями при торцевому фрезеруванні, як правило, мають на увазі і ті, і інші, маючи на увазі коливання, які відбуваються на власній частоті системи.

Таким чином, зменшення резонансних вимушених коливань і автоколивань, що виникають в процесі торцевого фрезерування внаслідок регенеративного ефекту, за рахунок використання обробки зі змінною швидкістю різання, дозволить як збільшити продуктивність обробки, так і забезпечити необхідну геометричну точність оброблених поверхонь.

1.7. Висновки до розділу

З аналізу літературних і довідкових даних встановлено:

1) Ефективність торцевого фрезерування можна підвищити придушенням вібрацій, що виникають в процесі обробки. Це дозволить збільшити гранично допустимі значення глибини різання, подачі на зуб і швидкості різання, а також поліпшити точність і якість оброблених поверхонь. Це також дозволить підвищити економічну ефективність за рахунок збільшення стійкості інструменту.

2) Зменшити рівень вібрацій та підвищити ефективність операцій торцевого фрезерування, можна при використанні САМ систем, а саме Cam систем нового покоління, з такими програмними модулями як IMachining, від SolidCam. Спеціальні, оптимізовані траєкторії та автоматичний підбір сприятливих режимів різання, залежно від параметрів оброблюваного матеріалу, параметрів ріжучого інструмента та параметрів верстата, оптимізують процес торцевого фрезерування та сприяє зменшенню вібрацій, але не може їх виключити.

3) Зменшити рівень вібрацій при торцевому фрезеруванні можна або впливом на вимушені коливання, або на автоколивання в залежності від того,

які з них переважають. Для ефективного впливу на процес розвитку коливань в системі, необхідно створити певні умови обробки, що дозволить, як забезпечити необхідну точність, так і підвищити якість оброблених поверхонь.

4) При торцевому фрезеруванні найбільш прийнятним способом впливу на регенеративне збудження коливань є змінна швидкості різання. Обробку зі змінною швидкістю різання слід здійснювати насамперед за рахунок зміни регульованих параметрів обробки, як частоти обертання, так і хвилинної подачі. Поєднання певних значень цих двох параметрів, істотно впливає на коливання в технологічній системі, що особливо помітно, зі збільшенням швидкості різання.

5) Для реалізації технології обробки зі змінною швидкістю різання потрібно область зміни її оптимальних значень. Це вимагає побудови математичної моделі процесу різання на основі даних про структуру динамічної системи досліджуваного верстата, що утворюють її процеси і зв'язки, а також механізми збудження коливань в ній, і дослідження характеру впливу прогнозованих факторів обробки на процес розвитку коливань в системі.

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТОРЦЕВОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ

2.1. Структурна схема динамічної системи верстата

Літературний аналіз сучасного стану технології торцевого фрезерування показав, що забезпечити її точність можна шляхом демпфірування коливань в технологічній системі, на основі обробки зі змінною швидкістю різання. Її реалізація вимагає встановлення взаємозв'язку між геометричними параметрами обробленої поверхні, умовами різання і вібраціями в технологічній системі. Для виявлення зазначених взаємозв'язків і їх оцінки необхідно комплексне дослідження технологічної системи. Найбільш універсальним методом дослідження є **математичне моделювання**, завдання якого, в даному випадку, полягає в побудові математичної моделі, яка дозволить дослідити як коливальні процеси в будь-який з підсистем технологічної системи, так і процеси формоутворення при різанні.

Структурна схема динамічної системи металорізального верстата, що використовувалась при побудові моделі, представлена на рис. 2.1. На цій схемі робочі процеси, що протікають в верстаті при різанні, групувалися за їх приналежності до якого-небудь реального об'єкту або групі об'єктів однієї природи, і ці об'єкти були прийняті в якості елементів схеми. Таким чином, були сформовані наступні об'єкти: пружна система, яка об'єднує процеси переміщення і пружного деформування вузлів верстата, процеси тертя, теплові та інші процеси, що відбуваються між елементами пружної системи; заготовка, яка об'єднує процеси формоутворення і деформування, опору пластичного деформації і інші процеси, що протікають в зоні різання; інструмент не містить процесів, але він введений в схему як проміжний елемент між пружною системою і заготовкою, що визначає вхідний вплив для процесу

формоутворення (рис. 2.1). Така структурна схема може бути представлена як сукупність трьох об'єктів: формотворного (інструмент), формовимірюваного (заготовка) і деформуючого від сил, що діють в зоні контакту перших двох елементів (пружна система).



Рис. 2.1. Структурна схема динамічної системи металорізального верстата

Далі при описі математичної моделі термін «заготовка» буде мати на увазі не реальну заготовку, а відповідний їй на схемі об'єкт, так само як і терміни «інструмент», «підсистема інструменту» і «підсистема заготовки». Вплив на об'єкти з боку інших об'єктів, будуть іменуватися зв'язками; ланцюг дій, що включає об'єкти і зв'язки між ними, - контуром зв'язку. Взаємодія об'єкта з іншими об'єктами визначається вхідною координатою - фізичною величиною, яка описує вплив на даний об'єкт, і вихідною координатою - результатом впливу. Стан об'єкта визначається параметрами, які поряд із вхідною координатою визначають результат впливу (наприклад, товщина зрізу для заготовки).

Взаємодія об'єктів починається зі зміною часу t , який визначає переміщення елементів пружної системи внаслідок робочих рухів верстата і зміна взаємного положення інструменту і заготовки. На схемі воно представлено як зовнішній вплив на пружну систему, що викликає зміна її налаштування.

Об'єкт пружної системи складається, по суті, з інших об'єктів, що володіють властивостями деформування, - підсистем і коливальних контурів. Як було встановлено в пунктах 1.2 та 1.3, коливання підсистеми інструменту при торцевому фрезеруванні мають вирішальний вплив на стійкість інструменту і шорсткість обробленої поверхні, а коливання підсистеми заготовки - на міцність вузлів верстата і параметри макрогеометрії обробленої поверхні, тому в розрахункову схему пружної системи були включені обидві ці підсистеми. Кожна з цих підсистем включає в себе кілька коливальних контурів, розташованих в просторі вздовж основних осей координат (тобто x , y , z), а підсистема інструменту також містить і коливальний контур (рис. 2.1).

В процесі обробки кожен контур пружної системи здійснює якесь переміщення в результаті робочих рухів і вібропереміщень його ланок. Це призводить до того, що змінюються координати положення останніх, а також їх похідні. Оскільки пружна система складається з двох взаємодіючих підсистем (інструменту і заготовки), то виходом пружної системи є кінематичні характеристики руху ланок коливальних контурів підсистеми інструменту щодо відповідних ланок підсистеми заготовки. Вони є входом для інструменту (переміщення X_u , Y_u , Z_u , ϕ_u і швидкість v_{xu} , v_{yu} , v_{zu} , ω_u) і визначають його положення в просторі в будь-який момент часу.

Процес торцевого фрезерування в більшості випадків характеризується одночасною роботою декількох різальних кромek, кожна з яких є джерелом порушення вібрацій. В роботі [10] показано, що вібропереміщення вузла механічного кріплення змінних пластин на резонансних частотах становлять 10^{-3} - 10^{-4} мкм. Тому можна прийняти, що система «ріжучий елемент - корпус» є абсолютно жорсткою, і фреза здійснює рух в процесі вібрацій як єдине ціле. Однак в залежності від конструкції інструменту ріжучі елементи можуть мати різне положення щодо його корпусу. Це положення вирішальним чином впливає на величину перетину шару матеріалу, що зрізається даними зубом. Тому інструмент доданий в структурну схему динамічної системи верстата як окремий елемент, вихідними координатами якого є становище ріжучої кромки

X_k, Y_k, Z_k φ_k і її швидкість $V_{xk}, U_{yk}, V_{zk}, \omega_k$ відносно до заготовки. Ці параметри є входом для заготовки.

Заготовка являє собою тіло, яке деформується, або якийсь обсяг матеріалу, що піддається механічній дії більш твердої і ріжучої кромки інструменту, яка не деформується, що здійснює рух відносно до заготовки. В результаті цієї взаємодії частина об'єму заготовки видаляється, але при цьому в її тілі виникають сили опору, які впливають на пружну систему верстата. Таким чином, вихідними координатами заготовки є геометричні параметри оброблюваної поверхні заготовки, що змінюються в результаті процесу формоутворення і характеризують результат обробки, а також складові сили різання, що є входом для пружної системи (P_x, P_y, P_z). Величина сили різання залежить від товщини a і ширини зрізуваного шару, а також від швидкості відносного руху інструмента (або зуба інструмента) і заготовки v_{ont} , які визначаються відносним становищем ріжучої кромки інструменту і заготовки в даний момент часу.

Таким чином, математична модель технологічної системи може бути представлена сукупністю трьох моделей:

- 1) модель пружної системи;
- 2) модель інструменту;
- 3) модель заготовки.

Модель будь-якого об'єкта динамічної системи включає в себе, в першу чергу, опис вхідних і вихідних параметрів, а також основні залежності, що зв'язують їх. Аналіз схеми на рис. 2.1 показав, що в якості вхідних і вихідних координат об'єктів динамічної системи можуть бути або кінематичні характеристики руху, або сили. Залежно від поєднання цих параметрів математична модель перетворення вхідних координат у вихідні може містити геометричну і/або динамічну модель. Геометрична модель має на увазі сукупність рівнянь, що зв'язують координати об'єкта (або його елементів) і їх похідні виходячи конструктивно-геометричних міркувань, без урахування діючих сил. Динамічна модель містить залежності між діючими на елемент

силами і кінематичними параметрами його руху. Геометрична модель використовується, коли входом і виходом об'єкта є його кінематичні характеристики, динамічна - коли хоча б один з параметрів - сили.

Відповідно до запропонованої класифікації математична модель пружної системи може бути представлена як сукупність динамічної моделі перетворення величини силового впливу, що діє на вході пружної системи, в переміщення її елементів, і геометричної моделі для зв'язку координат інструмента і заготовки. Математична модель інструменту є геометричною моделлю перетворення координат інструмента в координати кожної його ріжучої кромки (або її вершини). Математична модель заготовки включає динамічну модель для розрахунку сил різання в залежності від параметрів зрізаного шару, а також геометричну модель для перетворення координат ріжучої кромки в параметри зрізаного шару.

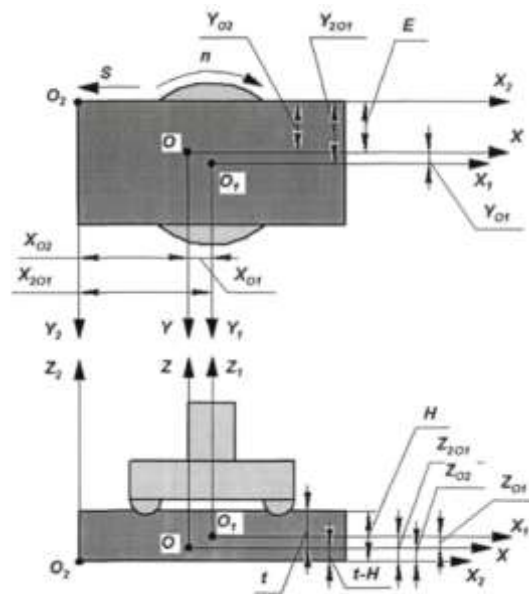
Основна мета, яка переслідувалася при побудові математичної моделі - це адекватне відображення основних закономірностей збудження вимушених коливань і автоколивань при торцевому фрезеруванні, як факторів, що визначають точність обробки. Особливу важливість при цьому має завдання визначення параметрів шару, що зрізається і впливу на них хвилеподібного сліду на поверхні різання. Досягти поставленої мети можна, якщо є досить точний геометричний опис поверхні різання з усіма нерівностями, що виникають на ній в процесі її формування внаслідок відносних коливань інструменту і заготовки, і відомого положення ріжучої кромки щодо заготовки. Тоді параметри зрізаного шару з урахуванням поточних вібропереміщень елементів технологічної системи і коливань хвилеподібного сліду визначаються перетином поверхні різання передньою поверхнею зуба інструмента. Для цього необхідно, щоб математичний опис поверхні різання було динамічним, тобто воно повинно змінюватися в процесі моделювання при зрізанні зубами нових шарів матеріалу.

Це завдання примикає до іншої задачі моделювання процесу обробки - математичний опис обробленої поверхні. Ця поверхня, так само як і поверхня

різання, формується в результаті зрізання ріжучими крайками шарів матеріалу. Тому ці два завдання були об'єднані в одне - математичний опис оброблюваної поверхні заготовки, що включає необроблену поверхню, поверхня різання і оброблену поверхню.

2.2. Математична модель пружної системи верстата

Входом об'єкта «пружна система» є складові сили різання, а також модельне час, виходом - положення інструмента щодо заготовки, яке визначається робочими рухами органів верстата і вібропереміщень його ланок під впливом цих сил. Тому математична модель пружної системи включає динамічну модель, а також геометричну для зв'язку координат інструмента і



заготовки.

Рис. 2.2. Взаємозв'язок систем координат

Для визначення відносного положення інструмента і заготовки було введено кілька систем координат. Перша з них - це система координат (далі СК) верстата $O_{схсузс}$, представлена на рис. 2.2. Вона була введена для відображення результатів розрахунку вібропереміщень в зручному і звичному вигляді. Оскільки значення вібропереміщень не залежить від положення маси, яка коливається відносно початку координат, то становище центру СК верстата

може бути довільним, а напрямок її осей має співпадати з загальноприйнятих при побудові розрахункових схем фрезерних верстатів [2]. Для спрощення розрахунків прийнято ще три додаткові системи координат (рис. 2.2):

$Oxyz$ - базова СК; вона нерухома, в ній задаються положення центрів інших СК, в ній розраховується їх взаємне положення; її положення залежить від розташування шпинделя відповідно столу верстата (горизонтальне або вертикальне);

$O_1x_1y_1z_1$ - СК інструменту, рухається разом з інструментом, в ній записуються його геометричні параметри;

$O_2x_2y_2z_2$ - СК заготовки, рухається разом із заготовкою, і в ній виконується запис геометричних параметрів оброблюваної поверхні.

Взаємне положення різних СК прийнято наступним:

1. Відповідні осі всіх СК спрямовані однаково.
2. У початковий момент системи координат $Oxyz$ і $O_1x_1y_1z_1$ збігаються. При цьому вісь z (і z_1) спрямована уздовж осі фрези, а площина Oxy (і $O_1x_1y_1$) торкається обробленою поверхнею заготовки.

3. Центр СК заготовки O_2 змістять відносно центру базової СК O уздовж осі y на величину, відповідну зміщенню заготовки відповідно інструменту по ширині. Площина $O_2x_2y_2$ зміщенна відносно базової площини Oxy уздовж осі z на величину, що дорівнює різниці товщини заготовки і глибини різання.

Всі переміщення елементів пружної системи фіксуються в базовій СК. Якщо центр СК заготовки O_2 поєднати з вихідною ланкою підсистеми заготовки, а центр СК інструменту O_1 - з вихідним ланкою підсистеми інструменту, то координати X_{O1}, Y_{O1}, Z_{O1} визначають положення СК інструменту, а X_{O2}, Y_{O2}, Z_{O2} - СК заготовки щодо базової СК $Oxyz$. Оскільки входом об'єкта «інструмент» є координати його положення відносно заготовки, то необхідно визначити положення точки O_1 в СК заготовки $O_2x_2y_2z_2$.

На рис. 2.2 показано взаємозв'язок систем координат. З наведених малюнків неважко визначити співвідношення, що зв'язують координати:

$$\begin{cases} \bar{X}_{201} = \bar{X}_{01} - \bar{X}_{02}; \\ \bar{Y}_{201} = \bar{Y}_{01} - \bar{Y}_{02}; \\ \bar{Z}_{201} = \bar{Z}_{01} - \bar{Z}_{02}; \\ \varphi_2 = \varphi, \end{cases} \quad (2.1)$$

Де φ_2 і φ - кутові положення фрези в СК заготовки і в базовій СК відповідно, радіани.

Співвідношення (2.1) визначають положення точки O_1 інструменту в СК заготовки. Вони можуть бути також використані для визначення положення в СК заготовки будь-якої точки, для якої відомі координати в базовій СК, в тому числі для точок, що належать ріжучим кромкам інструмента.

Динамічна модель пружної системи верстата пов'язує сили, які діють на її вихідні ланки, разом з вібропереміщеннями. Пружна система горизонтально-фрезерного верстата має складну просторову структуру, але з достатньою для практики точністю, за даними роботи [2], в кожному з напрямків може бути представлена з чотирьох основних коливальних мас: консоль, салазки, стіл і шпиндель з інструментом. Залежно від положення щодо зони різання вони згруповані у дві підсистеми: підсистему інструменту, що містить всього одну масу - шпиндель, і підсистему заготовки, що містить три інші маси. Групування коливальних мас в межах однієї підсистеми відповідно до їх положення відносно осей координат призводить до утворення контуру пружної системи з назвою, що відповідає його осі. Всі маси, що входять в контур, здійснюють не тільки власні вібропереміщення, але і загальний рух, що накладається на контур ззовні. При цьому контур виступає вже як єдине ціле, і його положення характеризується координатою уздовж осі контуру. Так, наприклад, якщо для контуру X однією з підсистем задано рівномірний рух зі швидкістю v_x з початкового положення X_{0k} , то координата i -ої маси буде визначатися зі співвідношення:

$$X_i = X'_i + X_k = X'_i + v_x \cdot t + X_{0k},$$

де X'_i - зміщення i -ої маси внаслідок її власних коливань, м; X_k - зміщення контуру, м.

Загальний рух контурів обумовлений робочими рухами вузлів верстата: коливальний контур підсистеми інструменту здійснює рівномірний обертальний рух, обумовлене обертанням шпинделя; контур X підсистеми заготовки здійснює рівномірний поступальний рух, обумовлене рухом подачі; контури Y і Z тієї ж підсистеми мають початкові зміщення, що відповідають положенню заготовки щодо інструменту перед початком обробки (рис. 2.1), тобто контур Y зміщений вздовж ширини заготовки на величину, рівну її зміщенню щодо інструменту, а контур Z - уздовж товщини заготовки на величину, рівну відстані від поверхні столу до нижньої точки ріжучої кромки інструменту.

Таким чином, якщо позначити товщину заготовки як H (завжди $H > 0$), глибину різання як $t_{різ}$ (завжди $t_{різ} > 0$), а вектор зміщення заготовки щодо інструменту по ширині як E ($E < 0$ - зустрічна схема, $E > 0$ - попутна), то рівняння (2.1) можна переписати у вигляді:

$$\begin{cases} \bar{\bar{X}}_{201} = \bar{X}'_{01} - \bar{X}'_{02} - \bar{S}; \\ \bar{\bar{Y}}_{201} = \bar{Y}'_{01} - \bar{Y}'_{02} - \bar{E}; \\ \bar{\bar{Z}}_{201} = \bar{Z}'_{01} - \bar{Z}'_{02} = t_{різ} + H, \end{cases} \quad (2.2)$$

де \bar{X}'_{01} , \bar{Y}'_{01} , \bar{Z}'_{01} - вектори віброзміщення центру СК інструмента;
 \bar{X}'_{02} , \bar{Y}'_{02} , \bar{Z}'_{02} - вектори віброзміщення центру СК заготовки; \bar{S} - вектор переміщення заготовки від руху подачі (завжди $\bar{S} < 0$).

Розрахункові моделі підсистеми інструменту представлені на рис. 2.3, підсистеми заготовки - на рис. 2.4. Підсистема інструмента включає чотири коливальних контури, в кожному з яких для стандартної фрези по одній масі. Модель підсистеми заготовки включає два коливальних контури, в кожному з яких по три маси.

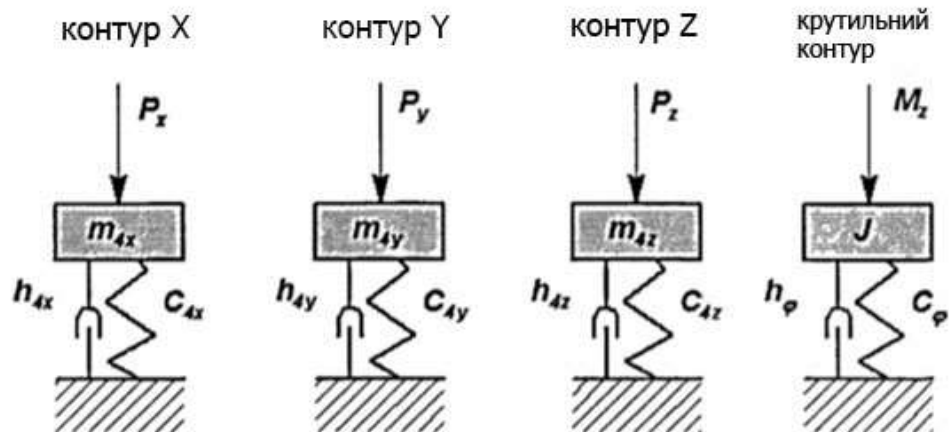


Рис. 2.3. Розрахункові моделі підсистеми інструменту

Оскільки в даному випадку мова йде про механічну коливальну систему, то з достатньою для практики точністю вона може бути ідентифікована системою диференціальних рівнянь другого порядку [18]. При цьому рух кожної маси пружного ланцюга може бути описаний одним диференціальним рівнянням, а система рівнянь описує поведінку всього ланцюга в цілому.

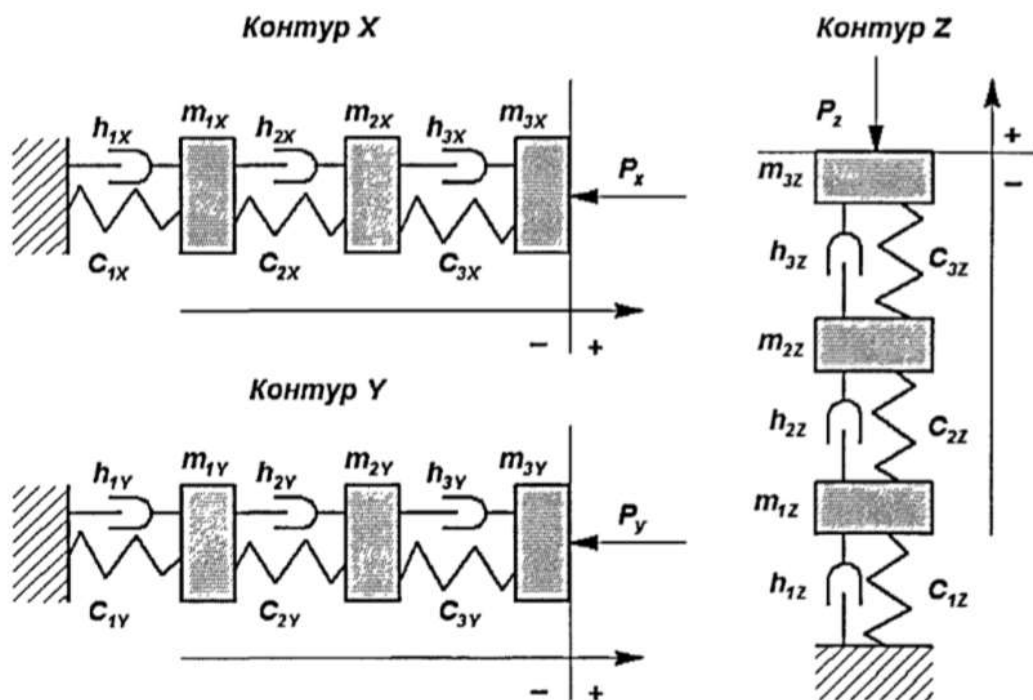


Рис. 2.4. Розрахункові моделі підсистеми заготовки

При русі n мас, що входять в один контур і пов'язаних між собою пружними і дисипативними елементами (рис. 2.5), векторне рівняння руху i -тої маси буде:

$$m_i \cdot \bar{a}_i = \bar{F}_i + \bar{P}_i - \bar{F}_{i+1}, \quad (2.3)$$

де P_i - зовнішній силовий вплив на i -у масу, Н;

F_i – Пружно-деформуюча сила на i -й ланці, Н:

$$F_i = C_i \cdot (X'_{i-1} - X'_i) + h_i \cdot (v_{i-1} - v_i);$$

Fu_i - інерційна сила на i -й ланці, Н:

$$Fu_i = -m_i \cdot a_i;$$

X'_i і v_i , - вібропереміщення (м) і швидкість (м / с) i - тої маси.

При такому поданні рівняння руху має один і той же вид для всіх мас пружною ланцюга. При цьому для крайніх мас деякі складові просто виявляються рівними нулю. Як правило, зовнішній силовий вплив задається не для всіх мас ланцюга, а тільки для крайніх. Тому розрахунок слід починати з них, їх зміщення визначає силовий вплив для інших мас. Розрахунок закінчується, коли визначені характеристики руху всіх мас в ланцюзі.

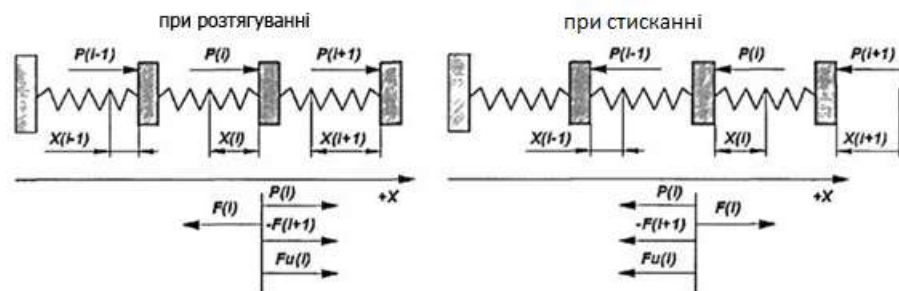


Рис. 2.5. Розрахункова схема контуру пружної системи

При русі мас, що входять в пружний контур, може виникати ситуація, коли переміщення однієї маси щодо іншої не може бути більше заданої величини. Для цього в моделі допускається наявність жорсткого упору для цієї маси (рис. 2.6). Тоді рівняння (2.3) в залежності від напрямку деформації дещо змінюється. [19]

При стисненні, $i-1$ -ї і i -ї маси в результаті замикання зв'язку між ними мають загальне рівняння руху:

$$\begin{cases} -\bar{F}_i + \bar{P}_{i-1} + \bar{F}u_{i-1} + \bar{F}_{i-1} - R_i = 0; \\ -\bar{F}_{i+1} + \bar{P} + \bar{F}u_i + \bar{F}_i + R_i = 0. \end{cases} \text{ або } \begin{cases} m_{i-1} \cdot \bar{a}_{i-1} = \bar{P}_{i-1} + \bar{F}_{i-1} - \bar{F}_{i+1} + \bar{P}_i - m_i \cdot \bar{a}_i; \\ m_i \cdot \bar{a}_i = \bar{P}_{i-1} + \bar{F}_{i-1} - \bar{F}_{i+1} + \bar{P}_i - m_{i-1} \cdot \bar{a}_{i-1}. \end{cases} \quad (2.4)$$

Відповідно до закону збереження кінетичного моменту при зіткненні двох тіл вони набувають одну загальну швидкість, рівну

$$v_i = v_{i-1} = \frac{m_i \cdot v_i + m_{i-1} \cdot v_{i-1}}{m_i + m_{i-1}}. \quad (2.5)$$

Те, як маса, упершись в іншу масу, буде вести себе, залежить від сумарної сили, що діє на цю масу. Якщо сила притискає масу до упору, то дві маси рухаються спільно, якщо немає, то кожна маса рухається окремо відповідно до свого рівняння руху. Критерієм, що визначає, напрямком сумарної сили, є знак сили реакції R_i . Якщо $R_i < 0$, то маси рухаються порізно, якщо ж $R_i > 0$, то спільно, причому в момент контакту вони набувають однакову швидкість, а прискорення визначається за загальним рівнянням руху (2.4).

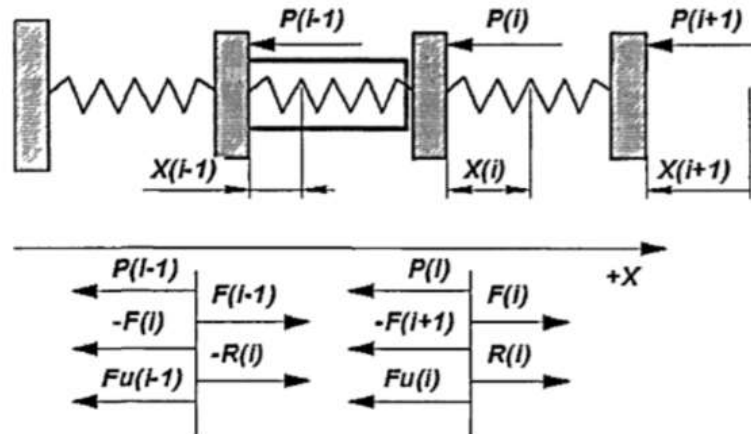


Рис. 2.6. Розрахункова схема контуру пружної системи, що працює на стиск, з жорстким упором для однієї з мас

При розтягуванні мають місце аналогічні співвідношення, тільки умовою, за якої маси рухаються порізно, є $R_i > 0$, а умовою, при якому вони рухаються спільно, є $R_i < 0$.

Для аналізу поведінки системи, описуваної рівняннями (2.3) і (2.4), необхідно вирішити задачу Коші, яка полягає в знаходженні залежностей $X_i(t)$,

$X_2(t), \dots, X_n(t)$, що проходять через точки, задані початковими умовами $(t_0, X_{10}), (t_0, X_{20}), \dots, (t_0, X_{n0})$, за допомогою інтегрування диференціальних рівнянь. З огляду на те, що динамічна система верстата є нелінійною і замкнутою, точне рішення розглянутої задачі, як правило, не вдається висловити аналітично через елементарні функції. Тому зазвичай використовують наближені чисельні методи. При цьому рішення задачі може бути охарактеризоване кінцевим числом параметрів і алгоритмом та полягає в повторенні алгоритму для отримання шуканого рішення X_n з використанням раніше обчислених значень. Для чисельного інтегрування диференціальних рівнянь існує безліч методів з різною точністю рішення, але одним з найбільш надійних вважається метод Рунге-Кутта четвертого порядку, який має похибку $R \sim (h^5)$, де h - крок інтегрування. Цей метод має досить високу точність і малу схильність до виникнення нестійкості рішення. Тому цей метод і використовувався для вирішення рівнянь (2.3) і (2.4).

Для систем диференціальних рівнянь другого порядку цей метод реалізується за допомогою формул:

$$\begin{aligned} k_1 &= h \cdot f \cdot (t_i, X_i, V_i); \\ k_2 &= h \cdot f \cdot (t_i + h/2, X_i + h \cdot V_i/2 + h \cdot k_1/8, V_i + k_1/2); \\ k_3 &= h \cdot f \cdot (t_i + h/2, X_i + h \cdot X_i/2 + h \cdot k_1/8, V_i + k_2/2); \\ k_4 &= h \cdot f \cdot (t_i + h, X_i + h \cdot V_i + h \cdot k_3/2, V_i + k_3); \\ V_{i+1} &= V_i + (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)/6; \\ X_{i+1} &= X_i + h \cdot V_i + (k_1 + k_2 + k_3)/6. \end{aligned}$$

Для забезпечення точності рішення крок інтегрування вибирається таким, щоб на кожному кроці інтегрування виконувалася умова:

$$\frac{k_1 - k_3}{k_1 - k_2} < \varepsilon, \quad (2.6)$$

де ε - задана похибка інтегрування; вона не повинна перевищувати декількох сотих. Параметрами динамічної моделі елемента пружної системи є: коефіцієнти статичної жорсткості, логарифмічний декремент, кутова частота вільних коливань.

2.3. Математична модель інструменту

Входом об'єкта «інструмент» є координати його положення в СК заготовки $(X_{201}, Y_{201}, \varphi_2)$, виходом - координати положення однієї з різальних кромек в тій же системі координат. Отже, для об'єкта «інструмент» необхідна геометрична модель перетворення координат. Геометрія інструмента визначається положенням кожного зуба в СК інструменту. При цьому, оскільки фреза є тілом обертання, для запису координат кожного зуба зручніше використовувати циліндричні координати, і положення деякої точки A , що лежить на вершині зуба, можна задати у вигляді (R_A, φ_A, Z_A) , де R_A - відстань від точки A зуба до осі обертання фрези; φ_A - кут між радіусом, проведеним в дану точку A , і віссю x_1 системи координат інструмента; Z_A - відстань від точки A до площини $O_1x_1y_1$, вимірюваний вздовж осі z_1 .

Якщо положення початку СК інструменту відносно СК заготовки відомо, то положення точки A ріжучої кромки буде (рис. 2.2):

$$\begin{cases} \bar{\varphi}_{2A} = \bar{\varphi}_2 + \bar{\varphi}_{1A}; \\ \bar{X}_{2A} = \bar{X}_{201} + \bar{X}_{1A} = \bar{X}_{201} + \bar{R}_A \cdot \cos \bar{\varphi}_A; \\ \bar{Y}_{2A} = \bar{Y}_{201} + \bar{Y}_{1A} = \bar{Y}_{201} + \bar{R}_A \cdot \sin \bar{\varphi}_A; \\ \bar{Z}_{2A} = \bar{Z}_{201} + \bar{Z}_{1A}, \end{cases} \quad (2.7)$$

де φ_2 - кут повороту системи координат інструмента відносно системи координат заготовки; φ_{1A} - кутове положення радіуса, проведеного в точку A , в системі координат заготовки; X_{1A}, Y_{1A}, Z_{1A} - положення точки A в СК інструменту.

Таким чином, була отримана математична модель інструменту, яка представляє собою геометричну модель перетворення координат інструмента в координати кожної його ріжучої кромки (або її вершини).

2.4. Математична модель заготовки

Входом об'єкта «заготовка» є координати положення вершини ріжучої кромки щодо заготовки $(X_{2A}, Y_{2A}, Z_{2A}, \varphi_{2A})$, а виходом - складові сили різання. Але

координати відносного положення не можуть бути безпосередньо використані для визначення сил різання, оскільки останні залежать не від них, а від параметрів зрізаного шару. Тому математична модель заготовки повинна включати модель для розрахунку сил різання і геометричну модель для перетворення координат ріжучої кромки в параметри зрізаного шару.

Модель для розрахунку сил різання була запозичена з роботи [20]. Вона являє собою залежність складових сил різання від параметрів зрізаного шару і швидкості різання:

$$\begin{cases} F_t = 5166 \cdot a^{0,77} \cdot b \cdot v^{-0,16}; \\ F_r = 12088 \cdot a^{0,662} \cdot b^{0,998} \cdot v^{-0,395}; \\ F_o = 1635 \cdot a^{0,6} \cdot b^{0,9} \cdot v^{-0,3}, \end{cases} \quad (2.8)$$

де F_t , F_r , F_o - тангенціальна, радіальна і осьова складові сили різання, Н; v - швидкість різання, м / хв; a і b - параметри зрізаного шару, мм.

Параметри зрізаного шару визначаються як:

$$a = S\varphi \cdot \sin \varphi_{nl}, \quad b = \frac{t}{\sin \varphi_{nl} \cdot \cos \lambda},$$

де a і b - товщина і ширина зрізаного шару, м; φ_{nl} і λ - головний кут в плані і кут нахилу ріжучої кромки, рад.

Геометрична модель заготовки призначена для тривимірного опису форми оброблюваної поверхні заготовки. При цьому приймається, що сама заготовка являє собою паралелепіпед, ширина якого дорівнює ширині обробки, довжина - необмежена, оскільки вона не впливає на результат розрахунку, а товщина вибирається з умови, що вона повинна бути не менше глибини різання. Вважається, що до обробки всі грані паралелепіпеда - ідеально плоскі. В результаті механічної обробки частина матеріалу заготовки видаляється з оброблюваної поверхні, і на її місці з'являється оброблена поверхня із залишеними на ній в процесі різання слідами ріжучих кромки інструмента. Нерівності, що з'являються на поверхні заготовки в результаті її обробки,

обумовлені не тільки кінематикою процесу формоутворення, але також і різними випадковими нестационарними процесами, що протікають в зоні різання, в тому числі вібраціями. При цьому нерівності, залишені на обробленій поверхні, називаються шорсткістю або хвилястістю (в залежності від кроку нерівності), і вони, як правило, впливають на експлуатаційні показники готової деталі. Нерівності, залишені на поверхні різання, впливають на перебіг самого процесу різання і, як правило, призводять до виникнення регенеративного ефекту, що супроводжується значним збільшенням рівня коливань. При цьому збільшується висота нерівностей на обробленій поверхні, і, як наслідок, погіршується якість обробки.

Таким чином, введення в динамічну модель металорізального верстата тривимірної моделі оброблюваної поверхні заготовки дозволяє розкрити зв'язок між динамічними процесами в технологічній системі і якістю обробки. Крім того, вона дозволяє визначати дійсну товщину різання з урахуванням всіх основних чинників, таких як слід на поверхні різання від проходу попереднього зуба, а також спільний вплив на неї вібропереміщень різних коливальних підсистем (зокрема, взаємний вплив згинальної і крутильної підсистем інструменту).

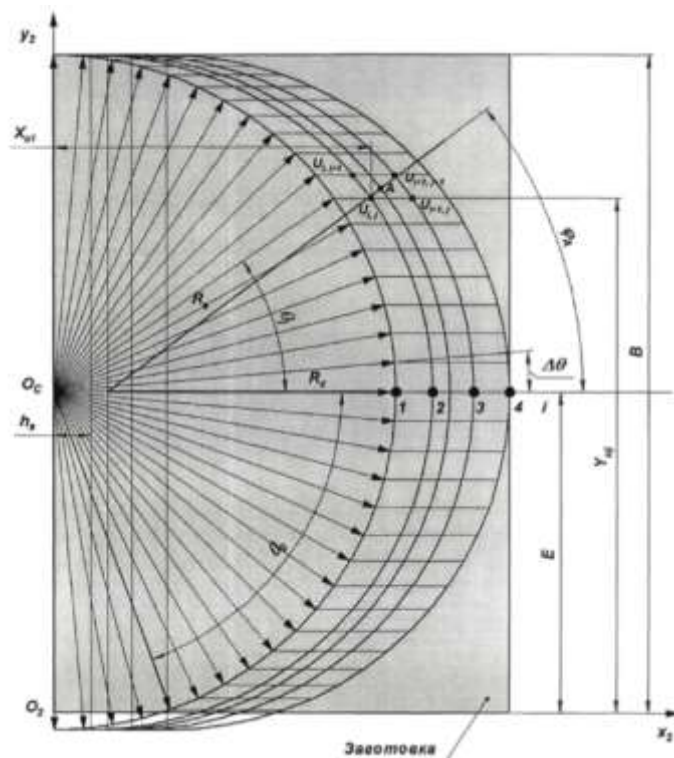


Рис. 2.7. Схема розташування вузлів полігональної сітки, що покриває оброблювану поверхню заготовки

Оскільки геометрична модель описує форму всієї оброблюваної поверхні заготовки, то для спрощення подальших описів приймемо, що під терміном «оброблювана поверхня» розуміється вся поверхня заготовки, що підлягає механічній обробці в ході даної операції, включаючи поверхню різання і оброблену поверхню.

Оскільки оброблювана поверхня має досить складну форму, її аналітичний опис можливо тільки в найпростіших випадках. Однак, оскільки розробляється математична модель орієнтована на застосування чисельних методів, то поставлена задача може бути спрощена дискретизацією математичного опису. З цією метою була використана каркасна модель, яка представляє собою полігональну сітку, що складається із сукупності ліній і покриває оброблювану поверхню. Положення вузлів цієї сітки відомо і визначено в СК заготовки, тобто для кожної точки поверхні U і відомі координати (X_{2U}, Y_{2U}, Z_{2U}) . При цьому заготовка розташована відносно СК $O_2x_2y_2z_2$, таким чином, щоб всі її точки мали невід'ємні координати, тобто площину $O_2x_2y_2$ збігається з нижньою площиною заготовки, а початок координат зміщений в одну з її вершин (рис. 2.7).

Положення кожного вузла сітки в площині $O_2x_2y_2$ задано і постійно, а його висотна координата Z_2 є змінною величиною, тобто її початкове значення визначається вихідною висотою заготовки, а кінцеве - висотою шару матеріалу, що залишився після механічної обробки.

Нехай точка поверхні U - вузлова; її положення в площині $O_2x_2y_2$ визначається координатами X_{2U} та Y_{2U} . Якщо ортогональну систему координат $O_2x_2y_2$ замінити на полярну і замість координати Y_2 використовувати кут, відлічуваний від горизонтальної осі, то за умови, що радіус полярної координати завжди постійний і дорівнює радіусу інструменту R_c положення будь-якої точки U в площині $O_2x_2y_2$ можна задати парою значень (X_{2U}, θ_u) (рис.

2.7). При цьому площину $O_2x_2y_2$ можна уявити покритою координатною сіткою, що складається з горизонтальних ліній, паралельних осі x_2 , - напрямних, і кіл радіусом зміщених одна відносно іншої уздовж осі абсцис, - утворюючих. Центр цієї нової системи координат зміщений щодо центру СК $O_2x_2y_2z_2$ уздовж осі y_2 на величину, рівну зміщенню інструмента відносно заготовки уздовж її ширини, тобто становище нового центру O_c визначається положенням центру фрези в початковий момент, тобто :

$$Y_2(O_c) = Y_{201} = E, \quad X_2(O_c) = 0, \quad Z_2(O_c) = 0.$$

Положення будь-якого вузла полігональної сітки, що покриває оброблювану поверхню, задається в новій СК $O_cx_2\theta z_2$. Його положення в площині $O_cx_2\theta$ визначається перетином i -ої твірної і j -ої напрямної координатної сітки, положення яких залежить від величини кроків вздовж відповідних осей $\Delta\theta$ і h_x , а також від їх порядкових номерів (рис. 2.7). При цьому кожен вузол сітки позначається парою індексів (i, j) , де i - номер твірної, j - номер напрямної. Знаючи закон розташування вузлів полігональної сітки, а також значення кроків цієї сітки, можна визначити координати будь-якого вузла сітки в системі координат заготовки $O_2x_2y_2z_2$.

Нехай h_x - крок між вузлами сітки уздовж напрямної, h_y - крок уздовж твірної, тоді кутовий крок між точками буде (рад):

$$\Delta\theta = h_y / R_c.$$

Кутове положення точки (рад), розташованої j -ї напрямної, визначається як:

$$\theta_j = \theta_0 + \Delta\theta \cdot j = \theta_0 + h_y \cdot j / R_c,$$

де θ_0 - початковий кут (рад), що залежить від положення центра сітки O_c щодо осі x_2 , $\sin \theta_0 = E / R_c$.

Координати X_2 і Y_2 вузла сітки $U_{i,j}$ визначаються зі значень індексів:

$$\begin{aligned} X_{zu} &= i \cdot h_x + R_c \cdot \cos \theta_j = i \cdot h_x + R_c \cdot \cos(\theta_0 + h_y \cdot j / R_c), \\ Y_{zu} &= -E + R_c \cdot \sin \theta_j = -E + R_c \cdot \sin(\theta_0 + h_y \cdot j / R_c) \end{aligned}$$

Звідки можна обчислити значення індексів для точки сітки:

$$\begin{cases} j = \frac{R_c}{h_y} \cdot \left(\arcsin\left(\frac{Y_{zu} + E}{R_c}\right) - \theta_0 \right), \\ i = \frac{X_{zu} - R_c \cdot \cos\left(\theta_0 + \frac{j \cdot h_y}{R_c}\right)}{h_x} \end{cases} \quad (2.9)$$

Якщо координати вершини ріжучого леза в СК $O_2x_2y_2z_2$ відомі, то за формулами (2.9) можна визначити індекси найближчих до леза вузлів сітки і точки перетину передньої поверхні інструменту з лініями, що з'єднують ці вузли. Знаючи положення цих точок, можна визначити параметри зрізаного шару, а також розрахувати формоутворення оброблюваної поверхні.

2.6. Дослідження коливальних процесів в підсистемі інструменту

Дослідження будемо проводити на підставі отриманих математичних моделей (2.1) ... (2.9) і припущеннях:

- 1) глибина різання залишається постійною протягом усього процесу обробки;
- 2) інструмент, жорстко закріплений в шпинделі, приймає на себе коливальні процеси, що відбуваються в пружній системі верстата.

Для дослідження була створена твердотільна модель торцевої фрези в зборі з оправкою і аналізу переміщення її характерних точок при додаванні навантажень, на основі рівняння (2.6).

Метою експерименту є вивчення власних коливань інструменту і його напружено-деформованого стану з урахуванням додаткової сили різання.

В ході моделювання розглядався процес торцевого фрезерування плоскої поверхні деталі зі сталі 30Л, торцевої фрезою Sandvik Coromant Ø200 мм, з числом зубів 12, з чотиригранними змінними пластинами, встановлену на оправку Sandvik Coromant TC50H70D60 (DIN 69871A).

Перша стадія моделювання - створення твердотільної моделі фрези (рис. 2.1a) по її геометрії з використанням CAD-системи (в роботі використовували систему автоматизованого проектування Autodesk Inventor). Наступний етап - формування кінцево-елементної моделі фрези на базі пакету динамічного аналізу Autodesk Inventor та нанесення сітки 3-х і 4-х вузлових кінцевих елементів на модель. В результаті перетворення отримана кінцево-елементна модель, що складається з 5900 оболонкових Shell-елементів.

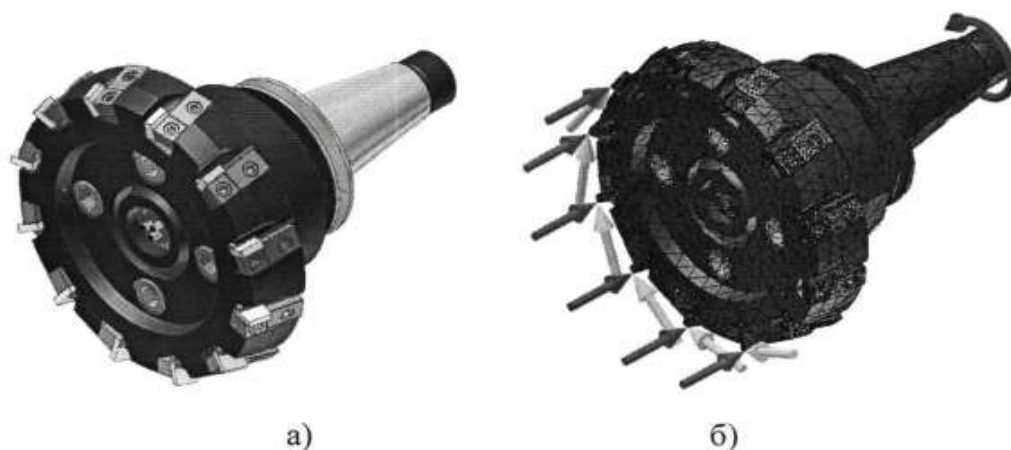


Рис. 2.8. Формування кінцево-елементної моделі інструменту

а) - створення моделі інструменту; б) - додаток навантажень і розбиття моделі на кінцеві елементи.

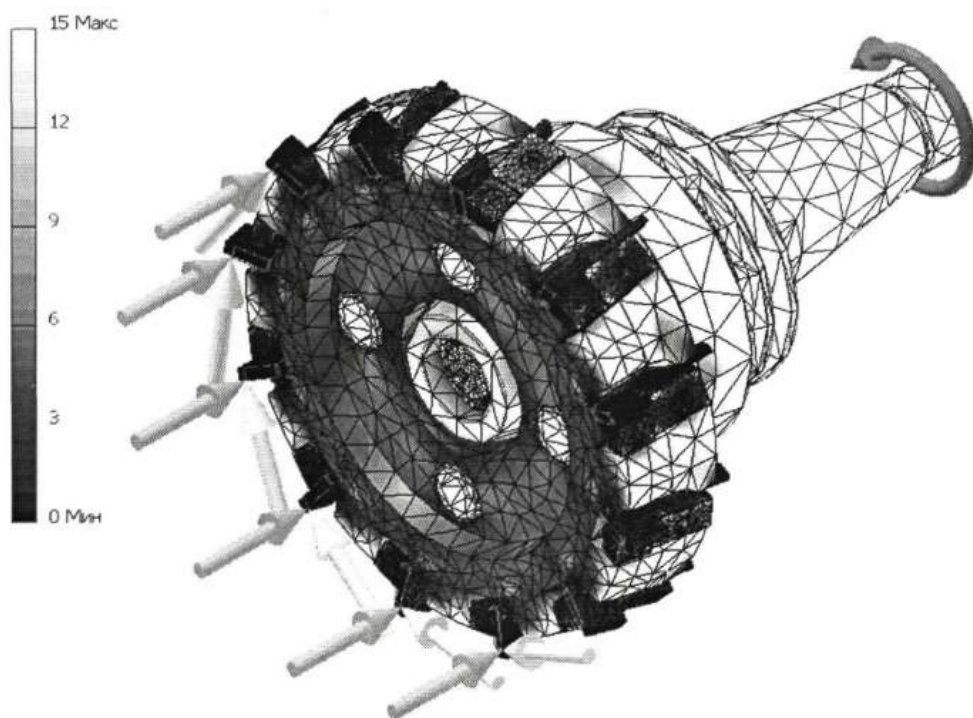


Рис. 2.9. Аналіз вібрацій торцевої фрези в зборі з оправкою, на основі комп'ютерного моделювання в середовищі Autodesk Inventor.

По завершенню роботи з геометричною моделлю були задані граничні умови для проведення розрахунку з урахуванням силової схеми процесу фрезерування (рис. 2.2), контактних взаємодій і фізико-механічних властивостей оброблюваного та інструментального матеріалів.

Віртуальний експеримент показав, що крутильний контур впливає на згинальний контур через зону різання, підтримуючи і посилюючи регенеративний ефект. При відсутності зв'язку через слід на поверхні різання впливом крутильного контуру можна знехтувати.

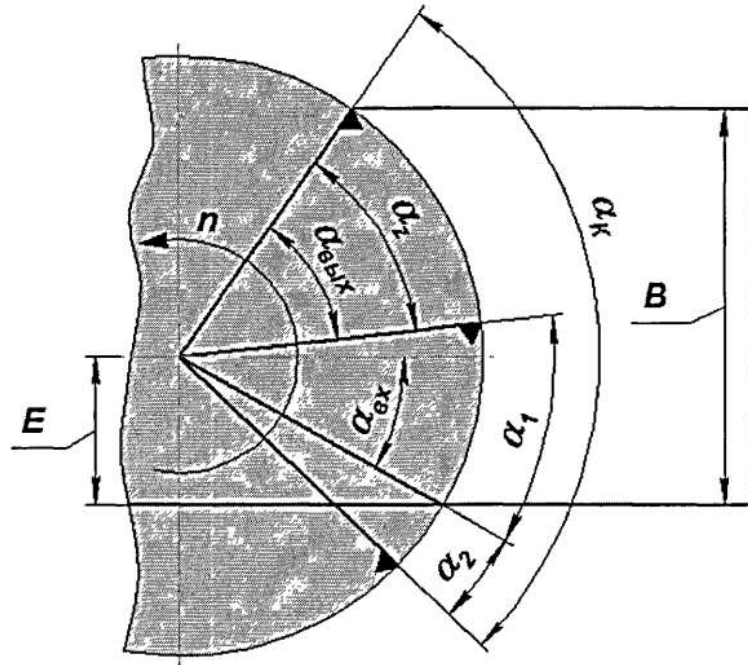


Рис. 2.10. Геометрична схема розташування зубів фрези в процесі різання.

Головною відмінністю процесу торцевого фрезерування є його переривчастість, при цьому в різанні може брати участь змінна кількість зубів. Число ріжучих кромок визначає силовий вплив на систему. За інтервал часу між входом в заготовку двох суміжних зубів воно послідовно приймає максимальне значення, відповідне Z_{max} зубам, які беруть участь в різанні, і мінімальне, відповідне Z_{min} зубам, середнє значення силового впливу за цей інтервал визначиться як (рис. 3.3):

$$F_{cp} = K_p \cdot a_H \cdot \frac{Z_{max} \cdot \alpha_1 + Z_{min} \cdot \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} = K_p \cdot a_H \cdot \left(Z_{min} + \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right),$$

де α_1, α_2 - кути, що визначають параметри силових імпульсів, рад.; α_z - кут між зубами, рад.

Величина $Z_{min} + \alpha_1/\alpha_z$ являє собою коефіцієнт перекриття:

$$K_n = Z_{\min} + \frac{\alpha_1}{\alpha_z} = \frac{\alpha_{BX} + \alpha_{BHX}}{\alpha_z}, \quad (2.10)$$

де α_{BX} і α_{BHX} - кути входу і виходу зубів з заготовки.

На підставі рівняння (2.10) можна зробити висновок, що величина коефіцієнта перекриття характеризує кілька параметрів. Ціла частина цього коефіцієнта вказує на мінімальну кількість зубів, що беруть участь в різанні, а отже, на мінімальне значення зовнішнього впливу на систему. Дробова частина - тривалість максимального навантаження системи, коли в різанні бере участь Z_{\max} зубів.

Для того, щоб виявити причини зростання рівня коливань, при зміні коефіцієнта перекриття, потрібно проводити експерименти за допомогою спеціального обладнання.

2.7. Висновки до розділу

1. Розроблено математичну модель процесу торцевого фрезерування, що представляє собою сукупність рівнянь (2.2), (2.3), (2.7), (2.8), (2.9) і враховує взаємозв'язок коливань елементів пружної системи і параметрів мікрогеометрії обробленої поверхні; модель дозволяє досліджувати як коливальні процеси в будь-якій з підсистем динамічної системи верстата, так і процеси формоутворення при різанні. Наскільки ця модель може бути адекватною покаже лише експериментальна перевірка.

РОЗДІЛ 3. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ТОРЦЕВОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ НА ПРАКТИЦІ

3.1. Розробка алгоритму управління процесом різання

Відмінною особливістю технологічної системи при обробці деталей є тісний взаємозв'язок процесу різання з динамікою системи, точністю і продуктивністю обробки. Для практичної реалізації технології обробки таких деталей необхідно вибрати допустимі режими різання, встановити значення вібродіагностичних параметрів технологічної системи для управління якістю оброблюваної деталі і технічним станом самої системи.

Технологічна система при торцевому фрезеруванні розглядалася як нелінійна динамічна система з запізненням. Її опис проводилося на основі математичного моделювання з складанням моделей (2.1) ... (2.9). Для повного опису стану та тенденції поведінки динамічного об'єкта з запізненням потрібно задати не тільки значення змінних стану в деякий момент часу, але і передісторію їх зміни. Поведінка об'єкта з запізненням визначається не тільки початковими значеннями його змінних стану, а й передісторією поведінки вхідних величин ланок запізнювання, еквівалентних прогнозом «запізнілих» змінних стану. Інтервал, на якому слід знати передісторію, визначається величиною затримки в ланці запізнювання. [21]. Ця обставина передбачає наявність зворотного зв'язку в системі. Вхідними параметрами є: параметри верстата, інструмента і заготовки, базові режими різання, допустимий рівень віброшвидкості, координатна взаємозв'язок між підсистемами верстата інструменту і заготовки. Вихідними параметрами, в даному випадку є: величина відхилень від площинності (параметр визначає точність обробки), фактичний рівень віброшвидкості шпинделя, знос інструменту.

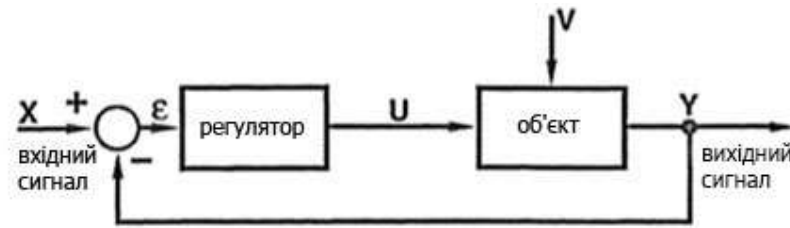


Рис. 3.1. Схема негативного зворотного зв'язку: X - вхідний сигнал; Y - вихідний сигнал; V - збурення; ε - сигнал неузгодженості, U - сигнал управління.

Досягнення певної точності лезової обробки означає, що значення вихідних параметрів повинні відповідати певному, заданому еталону, з відхиленнями від нього в відносно малому діапазоні (допуск). Тому, в даному випадку мова йде про негативного зворотного зв'язку. Та зворотній зв'язок, який сприяє підтримці стабільності системи, називається негативним зворотним зв'язком (рис. 3.1). Всі технічні системи, де головна функція - забезпечення стабільності деякого фактору, використовують цей механізм. Завдання негативного зворотнього зв'язку полягає в тому, щоб у відповідь на зовнішні впливи на систему виробляти власне управлінський вплив, що усуває наслідки цих зовнішніх впливів.

Принцип управління, заснований на використанні негативного зворотного зв'язку, характеризується тим, що не вимагає градування і зберігає високу точність і в тих випадках, коли навантаження і параметри елементів системи з часом змінюють свої значення. У цьому полягає основна перевага систем зі зворотним зв'язком. [22]

У системах із замкнутим циклом або зворотним зв'язком точність регулювання, тобто точність підтримки необхідного функціонального зв'язку (зокрема, пропорційного) між входом і виходом, в основному залежить від точності, з якою проводять вимірювання і порівняння необхідного і дійсного значень регульованої змінної.

Системи управління зі зворотним зв'язком - це системи автоматичного регулювання (САР). Зміни регульованих величин викликають не тільки керуючі, а й впливи, прикладені в відповідних точках системи автоматичного

регулювання. Управління здійснює цілеспрямоване зміна регульованих змінних. Збурення прагне порушити необхідну функціональну зв'язок між керуючим впливом і регульованої змінної. САР повинна вести себе по відношенню до керуючому впливам різному. Необхідно, щоб система здійснювала управління з найменшими похибками, компенсуючи дію збурень на регульовані змінні.

Отже, САР - це замкнута активна динамічна система направленої дії, що перетворює установку на її вході в регулюючий вплив, безпосередньо прикладається до об'єкта управління. Наявність подібної системи актуально при механічній обробці зі змінною швидкістю різання, особливо при великій площі оброблюваної поверхні.

В результаті був розроблений алгоритм управління процесом торцевого фрезерування на основі зворотного зв'язку (рис. 3.2.). Блок вихідних даних включає параметри застосовуваного верстатного обладнання, дані про властивості матеріалу деталі, параметри ріжучої частини інструменту і геометрична характеристика оброблюваної поверхні, допустима величина відхилень від площинності. На підставі цього, призначаються базові режими різання, визначається гранично допустиме значення глибини різання (за умови що її величина залишається постійною), допустимий рівень віброшвидкості шпинделя з інструментом, визначається оптимальний діаметр інструмента, задається координатна взаємозв'язок підсистем верстата, інструменту та заготовки на основі геометричних моделей (2.2), (2.7), (2.9). На «виході» визначаються фактичні значення відхилень від площинності обробленої поверхні, віброшвидкості шпинделя верстата з інструментом, знос ріжучої частини інструменту. Блок зворотного зв'язку припускає наявність трьох систем контролю вихідних параметрів.

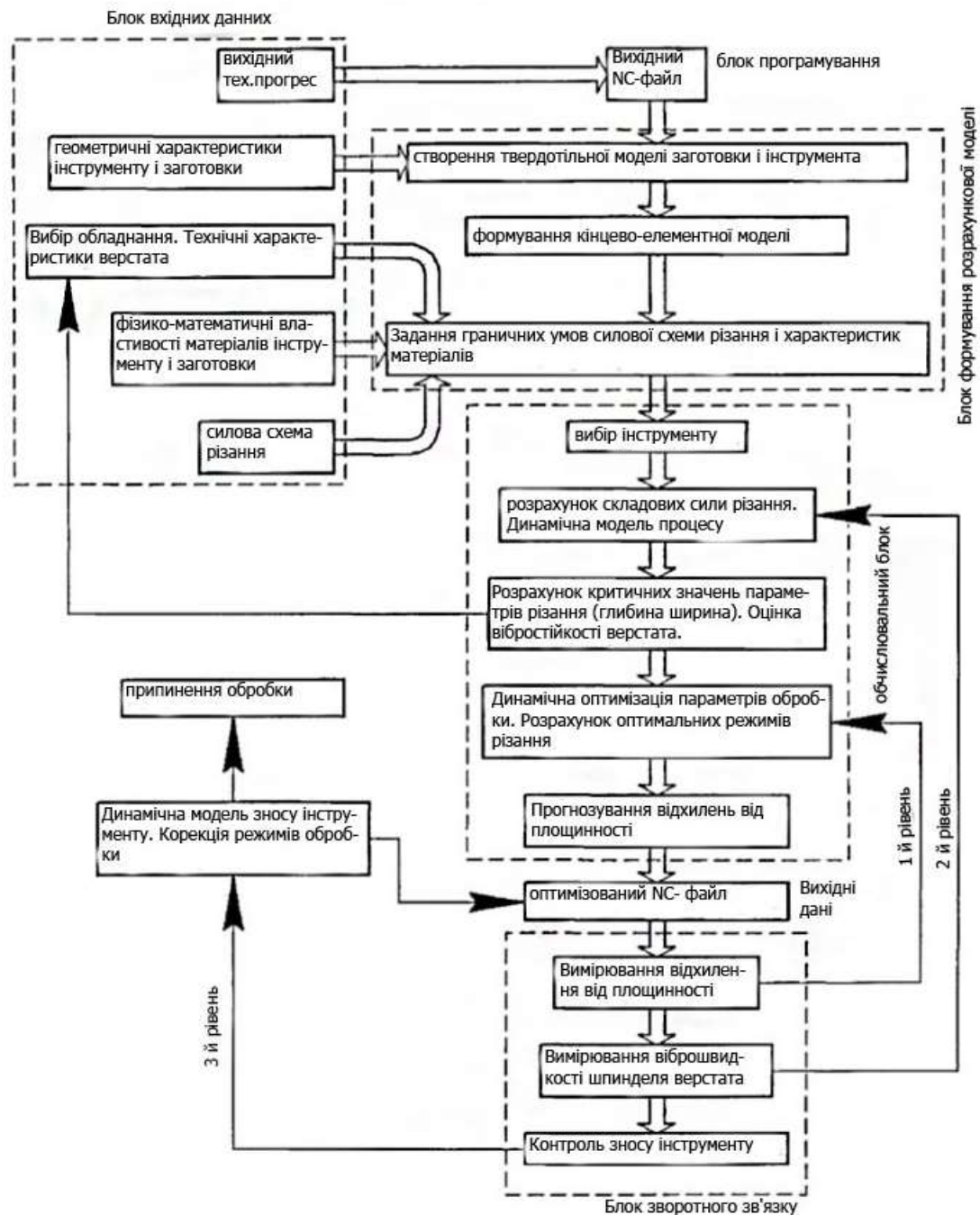


Рис. 3.2. Алгоритм роботи адаптивної системи торцевого фрезерування зі зворотним зв'язком

Обробка зі змінною швидкістю різання вимагає, щоб контроль вихідних параметрів здійснювався одночасно з процесом різання. Ця обставина вимагає безконтактного вимірювання контрольованих величин, системи безконтактного вимірювання віброшвидкості обертових механізмів і зносу ріжучої частини інструменту досить широко відомі, а для безконтактного вимірювання відхилень від площинності потрібна розробка відповідної системи контролю.

Якщо знос інструменту перевищує допустимий, система припиняє обробку, так як потрібна його заміна. Таким чином, величини відхилень від площинності оброблюваної поверхні і віброшвидкості інструменту повинні змінюватися тільки в межах малого заданого діапазону, в результаті система постійно знаходиться в режимі демпфірування коливань, що забезпечує задану точність обробки. Але, при реалізації такого алгоритму управління, необхідно враховувати взаємозв'язок відхилень від площинності з фактичним значенням віброшвидкості. Тому обчислювальний блок, повинен містити відповідний математичний опис зазначеного взаємозв'язку, для складання якої потрібна спеціальна методика визначення відхилень від площинності.

ВИСНОВОКИ

Геометрична точність плоских поверхонь корпусних деталей (наприклад, станин прокатного стану) при механічній обробці може бути забезпечена застосуванням операції торцевого фрезерування зі змінною швидкістю різання і управлінням процесом обробки на основі негативного зворотного зв'язку. У роботі були встановлені закономірності, що характеризують вплив прогнозованих факторів обробки: подачі, частоти обертання, швидкості різання, діаметра інструмента - на процес розвитку коливань в технологічній системі для точного торцевого фрезерування поверхонь для умов менш жорстких технологічних систем. Створено методику визначення області раціональних режимів точної фрезерної обробки поверхонь деталей із змінною швидкістю різання. Торцеве фрезерування зі змінною швидкістю різання, при наявності зворотного зв'язку, скорочує час виконання операції механічної обробки з досягненням необхідної точності при застосуванні портативного металорізального обладнання.

1. У роботі запропоновано і обґрунтовано метод підвищення точності операції торцевого фрезерування деталей, що полягає в демпфіруванні коливань, що виникають в технологічній системі в процесі різання, за рахунок застосування технології обробки зі змінною швидкістю різання.

2. Розроблено математичний опис процесу торцевого фрезерування, що враховує взаємозв'язок коливань елементів пружної системи і параметрів мікрогеометрії обробленої поверхні, що дозволяє досліджувати як коливальні процеси в будь-якій з підсистем технологічної системи, так і процеси формоутворення при різанні.

3. Виявлено область раціональних значень зміни швидкості різання і визначені області значень режимів різання, при яких система може бути поставлена в режим демпфірування коливань.

4. Запропоновано алгоритм системи управління процесом різання на основі негативного зворотного зв'язку, що дозволяє забезпечити необхідну точність торцевого фрезерування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Зайцев Г.Н., Федюкин В.К., Любомудров С.А. Нормирование точности геометрических параметров машин. / Под ред. Федюкина В.К. - М.: Академия (Academia). 2008. - 368 с.
2. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. -М.: Машиностроение, 1986. - 184 с. 22. Жесткость, точность и вибрации при механической обработке / Под ред. В.А. Скрагана: Машгиз, 1956. - 194 с.
3. Авдонин Г.Т., Алексеев А.В. Влияние колебаний технологической системы на эксплуатационные характеристики обрабатываемых деталей// Технология машиностроения. - 2001. - №3. - С. 12-13.
4. Касимов Л.Н., Праведников И.С. Технология формирования поверхностного слоя деталей. - Уфа, 1999. - 131 с.
5. Бармин Б.П. Вибрации и режимы резания. - М.: Машиностроение, 1972.- 56 с.
6. Васин С.А. Прогнозирование виброустойчивости инструмента при точении и фрезеровании. - М.: Машиностроение, 2006. - 384 с.
7. Васин С.А., Шадский Г.В., Кошелева А.А. Виброустойчивость резцов переменной жесткости при нестабильных режимах обработки // Технология мех. обр-ки и сборки: Сб. науч. тр. - Тула, 1996. - С. 89-97.
8. Безъязычный, В.Ф. Технологическое обеспечение обработки деталей на станках с ЧПУ. / В.Ф. Безъязычный, А.В. Лобанов // Рыбинск: РГАТА.-1994.- 89с.
9. Кедров С.С. Колебания металлорежущих станков. - М.: Машиностроение, 1978. - 199 с.
10. Опитц Г. Современная техника производства. - М.: Машиностроение, 1975. - 280 с.
11. Кудинов В.А. Динамика станков. - М.: Машиностроение, 1967. - 359 с.
12. Кондратов СГ. Гашение вибраций путем взаимной компенсации автоколебаний // Резание и инструмент - 1989. - №42. - С 93-99. 38. Корсаков, В.С. Точность механической обработки. - М.: Машгиз, 1961.-379 с.

13. Week M., Brecher C Werkzeugmaschinen 3. Mechatronische Systeme, Vorschubantriebe, Prozessdiagnose. - Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. - 421 p.

14. Городецкий Ю.И. Фундаментальные проблемы нелинейной динамики станков. Динамика технологических систем: Сб.тр. VII Междунар. н.-т. конф. - Саратов: СГТУ, 2004. - С. 161-165.

15. Електронний портал практичні рекомендації виконання процесу торцевого фрезерування 2018р. <http://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/knowledge/milling/pages/face-milling.aspx>. (дата звернення 10.03.2019).

16. Merritt H. E. Theory of Self-Excited Machine Tool Chatter// ASME J. English Industry. - 1965. - vol. 87. - pp.447-454.

17. Week M., Brecher C Werkzeugmaschinen 4. Automatisierung von Maschinen und Anlagen. - Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. - 497 p.

18. Петрова А.М., Афонин А.М., Царегородцев Ю.Н. Теоретические основы разработки и моделирования систем автоматизации. Учебное пособие. - М.: Форум, 2011. - 192 с.

19. Чемборисов Н.А. Процессы и операции формообразования. - М.: Академия (Academia), 2012. - 320 с.

20. Свинин В.М. Самоорганизация вторичных автоколебаний при лезвийной обработке //СТИН. - 2006. - №1 - С.7-13.

21. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: Учеб. Пособие. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. - 464 с.

22. Jemielniak K., Widota A. Suppression of Self-excited Vibration by the Spindle Speed Variation Method// Int. J. Mach. Tool Des. Res., 1984. - vol. 24. - pp. 207-214.

23. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс]: Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів

інженерних спеціальностей/ За заг. ред. О.А. Гавриша. — Київ : НТУУ «КПІ», 2016. — 28 с.